

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Optimización, diseño y desarrollo hardware de un potencióstato para la adquisición de señales electroquímicas.

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Autor: Anaya Aranda, Jacinto

Tutor: González de Rivera Peces, Guillermo

FECHA: Septiembre, 2019

Optimización, diseño y desarrollo hardware de un potencióstato para la adquisición de señales electroquímicas

AUTOR: Jacinto Anaya Aranda
TUTOR: Guillermo González de Rivera Peces

HCTLab
Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Septiembre de 2019

Resumen

En este trabajo de fin de máster se ha estudiado y diseñado, para su posterior implementación, un potencióstato. Un potencióstato es un sistema electrónico que va a permitir controlar el proceso de medición de una celda electroquímica de tres electrodos para tomar medidas de los niveles de concentración de una determinada sustancia en un medio. Hoy en día este tipo de sensores tienen un alto valor en nuestra sociedad en el ámbito alimentario, farmacéutico o sanitario.

Primero, se ha hecho un estudio y análisis de los principales diseños de potencióstatos que existen actualmente, viendo las ventajas y las desventajas de cada uno y analizando las características más cruciales con el fin de diferenciar las distintas partes en las que se puede dividir. Esta división se ha hecho con el objetivo de hacer más sencillo el diseño y poder ver el impacto de cada parte al conjunto.

Una vez diseñado e implementado en una PCB se procedió a realizar la configuración SW de los componentes electrónicos. Mediante el bus de comunicaciones USB para programar el microcontrolador y mediante el protocolo I2C para la programación interna entre componentes (convertidores, potenciómetro).

Por último y antes de empezar a hacer pruebas para obtener medidas reales, se realizaron varios tests para depurar posibles errores, ya fuesen a nivel HW debidos a posibles cortocircuitos o errores en la configuración de los pines, o a nivel SW provocados por una mala configuración de los registros de los componentes electrónicos.

Para ver el correcto funcionamiento del potencióstato diseñado se ha hecho una comparativa entre el potencióstato diseñado en este trabajo y un potencióstato comercial de la empresa Inbea.

Palabras Clave

Sensor, potencióstato, analógico, digital, amplificador operacional, hardware, software, microcontrolador, electrodos.

Abstract

This Final Master Thesis threats about the study, design and implementation of a potentiostat. A potentiostat are all the electronics components that allow to control the process of measure in a three electrodes electroquimic cell, in order to see the level of concentration of a specific substance in a solution. Nowadays this type of sensors has a high value in our society specially in food and health environment.

Firstly, it has been performed a study and an analysis about the mains designs that exist at present, to the see the advantages and the disadvantages of each one, and to distinguish the most important features of them. It has also been done a division of those designs in differents subparts to make easier this study and understand easily the functions of each one.

Once the PCB has been designed and implemented, it has proceeded with the SW configuration using the USB connection to configure the microcontroller and the I2C protocol to configure the different components that compose the potentiostat.

Finally and before the final tests, it has been done several test to debug errors. Those tests have allowed to detect errors in the HW due to short circuit or errors in the pins configurations and in the SW due to an error in the components bits configurations registers.

To check the correct potentiostat performance it has been done a comparative test between the design developed in this thesis and a comercial potentiostat from Inbea company.

Keywords

Sensor, potentiostat, analogic, digital, operational amplifier, hardware, software, microcontroller, electrodes.

Agradecimientos

En primer lugar, quería dar las gracias a mi familia, a mis padres Jacinto y Paqui, a mi hermana Almudena y al resto de familiares que me han dado su apoyo desde el primer al último día en todo este tiempo.

A mi tutor, Guillermo, por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo con él. Gracias por la paciencia y dedicación de enseñarme y ayudarme en el día a día.

A todos mis amigos tanto de Andalucía como de otros lugares, por todos esos buenos recuerdos y momentos que han hecho más llevadero este proyecto,

De verdad, muchas gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	2
2 ESTADO DEL ARTE	3
2.1 BIOSENSOR ENZIMÁTICO.....	3
2.2 CELDA ELECTROQUÍMICA	3
2.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS ELECTROQUÍMICOS.....	4
2.3.1 Potenciometría.....	5
2.3.2 Culombimetría	5
2.3.3 Voltamperometría.....	6
2.4 POTENCIOSTATO	7
2.5 PRINCIPALES DISEÑOS DE POTENCIOSTATOS	8
2.5.1 Diseño de un potencióstato de bajo coste	8
2.5.2 Potencióstato Diferencial	9
2.5.3 Potencióstato para mediciones de glucosa usando un ‘espejo de corriente’	10
2.5.4 Potencióstato con el electrodo auxiliar a tierra	11
3 DISEÑO HW DEL POTENCIOSTATO	13
3.1 PLANTEAMIENTO INICIAL DEL DISEÑO.	13
3.2 ELECCIÓN DE COMPONENTES.....	14
3.2.1 Protocolos de comunicación	15
3.2.2 Alimentación del potencióstato	16
3.2.3 Etapa de medición: conversor I/V	17
3.2.4 Etapa de control de electrodos	19
3.2.5 Elección del microcontrolador.....	22
3.3 TÉCNICAS PARA REDUCIR EL RUIDO	23
4 DESARROLLO SW POTENCIOSTATO	25
4.1 CONFIGURACIÓN SW DEL POTENCIÓMETRO	25
4.2 CONFIGURACIÓN SW DEL CONVERSOR ADC	26
4.3 CONFIGURACIÓN SW DEL CONVERSOR DAC	27
5 INTEGRACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	29
5.1 COMPROBACIONES PREVIAS	29
5.2 DESCRIPCIÓN PRUEBAS REALIZADAS	32
5.3 RESULTADOS OBTENIDOS	33
6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	39
6.1 CONCLUSIONES.....	39
6.2 TRABAJO FUTURO	39
REFERENCIAS	41
GOSARIO.....	43
ANEXOS	I
A ESQUEMÁTICO POTENCIOSTATO.....	I
B ESQUEMÁTICO PCB.....	II

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: FUNCIONAMIENTO ENZIMA	3
FIGURA 2-2: CELDA ELECTROQUÍMICA	4
FIGURA 2-3: VOLTAMETRÍA CÍCLICA	7
FIGURA 2-4: POTENCIOSTATO BÁSICO	7
FIGURA 2-5: POTENCIOSTATO DE BAJO COSTE	8
FIGURA 2-6: POTENCIOSTATO 'SINGLE-ENDED'	9
FIGURA 2-7: POTENCIOSTATO DIFERENCIAL	10
FIGURA 2-8: ESPEJO DE CORRIENTE EN UN POTENCIOSTATO	10
FIGURA 2-9: POTENCIOSTATO CON ELECTRODO AUXILIAR A TIERRA	11
FIGURA 3-1: ESQUEMÁTICO DEL POTENCIOSTATO	13
FIGURA 3-2: DISEÑO DE POTENCIOSTATO CON DETALLE DE LAS ALIMENTACIONES	14
FIGURA 3-3: ETAPA DE ALIMENTACIÓN	16
FIGURA 3-4: BLOQUE CONVERSOR I/V	17
FIGURA 3-5: BLOQUE CONTROL DE TENSIÓN DE ELECTRODOS	20
FIGURA 4-1: REGISTROS CONFIGURACIÓN POTENCIÓMETRO	25
FIGURA 4-2: REGISTROS CONFIGURACIÓN CONVERSOR ADC	26
FIGURA 4-3: REGISTROS CONFIGURACIÓN CONVERSOR DAC	28
FIGURA 5-1: DISPOSITIVO SIMULACIÓN ELECTRODOS	29
FIGURA 5-2: ENCAPSULADOS AO MCP6001	31
FIGURA 5-3: PCB DEL POTENCIOSTATO	32
FIGURA 5-4: ENTORNO PRUEBAS POTENCIOSTATO INBEA	33
FIGURA 5-5: INTERFAZ BIOGRAPH	34
FIGURA 5-6: RESULTADOS POTENCIOSTATO INBEA	34
FIGURA 5-7: ENTORNO PRUEBAS POTENCIOSTATO	35
FIGURA 5-8: RESULTADOS POTENCIOSTATO TFM	36
FIGURA 5-9: COMPARATIVA DE RESULTADOS	36

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3-1: ELECCIÓN AO DEL CONVERSOR I/V	18
TABLA 3-2: ELECCIÓN POTENCIÓMETRO	19
TABLA 3-3: ELECCIÓN ADC	19
TABLA 3-4: ELECCIÓN AO SEGUIDOR	21
TABLA 3-5: ELECCIÓN AO COMPARADOR	21
TABLA 3-6: ELECCIÓN DAC	22
TABLA 3-7: ELECCIÓN MICROCONTROLADOR	23

1 Introducción

1.1 Motivación

En nuestra sociedad tecnológica actual el tipo de energía más importante es la energía, eléctrica ya que es la que permite el funcionamiento de prácticamente cualquier tipo de dispositivo. En química, la rama de la electroquímica es la encargada de estudiar y analizar la energía eléctrica que se libera al producirse una determinada reacción química, reacción redox, o, al revés, se encarga de estudiar los efectos que produce al provocar una reacción química al inducir, a propósito, una determinada cantidad de energía eléctrica, electrolisis. Actualmente las técnicas de medición electroquímicas están adquiriendo una mayor importancia en nuestra sociedad debido a la cada vez mayor preocupación por control que las empresas y gobiernos están llevando a cabo en los distintos productos disponibles en el mercado, por ejemplo, los productos alimentarios o químicos. Otra área donde tiene una gran presencia este tipo de sensores es en el ámbito sanitario ya que permite realizar fácilmente, rápidamente y de una forma precisa análisis médicos de los pacientes para detectar posibles enfermedades o alteraciones con la suficiente antelación para ser tratados adecuadamente. Estas son algunas de las razones por las que en este proyecto se va a desarrollar e implementar un potencióstato. Un potencióstato es el dispositivo que permite controlar y monitorizar todos estos procesos de medición. El potencióstato que se va a desarrollar hará uso de un biosensor enzimático lo que aportará una mayor sensibilidad y precisión a las mediciones, además, se perseguirá durante todo el desarrollo que se tenga el menor coste y la mayor portabilidad posible para dar un primer prototipo que en un futuro, tras una mayor optimización, pueda incorporarse en los laboratorios para realizar pruebas. Otra de las motivaciones por las que se ha realizado este trabajo es la cada vez mayor accesibilidad y a un menor coste de los componentes necesarios para desarrollar y estudiar este tipo de dispositivos.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el diseño, implementación y correcto funcionamiento de un potencióstato con la adecuada elección de componentes para tener la mayor precisión posible en las medidas ya que las corrientes generadas por los biosensores son del orden de nano amperios, lo que conlleva que el tratamiento del ruido sea prioritario, para evitar falsear las medidas.

La función principal de un potencióstato es la de mantener constante el potencial entre los electrodos y de controlar todo el proceso inicial de calibrado para, posteriormente, obtener una medida con la máxima precisión posible, por lo que el diseño del potencióstato desarrollado en este proyecto deberá cumplir estas especificaciones. Otro objetivo que se ha propuesto es hacer que estos procesos sean lo más simples posibles para que el usuario no requiera de grandes conocimientos en electrónica para llevar a cabo pruebas.

Por último, se probará el correcto funcionamiento del prototipo de potencióstato comprobando que las mediciones realizadas se corresponden con la actual concentración que se está midiendo.

Con esto se pueden distinguir tres bloques que abarcan los objetivos especificados anteriormente:

- Diseño HW: diseño potencióstato, elección de componentes, implementación diseño final,
- Diseño SW: sw calibración potencióstato inicial, sw control y toma de medidas,
- Pruebas y resultado: resultados simulados, toma de medidas y resultados obtenidos.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- Estado del arte: se desarrollarán los conceptos relacionados con el dispositivo que se está analizando, desde el concepto básico de lo que es una celda electroquímica o las distintas técnicas que actualmente se utilizan para este tipo de pruebas o medidas, hasta el análisis de distintas topologías que algunos autores proponen en sus artículos.
- Diseño HW del potencióstato: propuesta del diseño de potencióstato que se ha elegido en este proyecto, dando las razones por la elección del diseño, distinguiendo entre los bloques que lo forman y razonando la elección de cada componente viendo los criterios de elección que se ha tomado.
- Diseño SW del potencióstato: realización del software que se utilizará para programar el microcontrolador que controla todos los procesos implicados en el correcto funcionamiento del potencióstato. Mostrando las medidas numéricas al usuario
- Integración, pruebas y resultados: en la integración del dispositivo se harán las pruebas del correcto funcionamiento del dispositivo,
Por último, se probará el funcionamiento con muestras reales para ver si las medidas obtenidas de concentraciones son correctas.
- Conclusiones y trabajo futuro: se hará un último análisis acerca del sistema implementado, junto con los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas. Además, se propondrán una serie de mejoras al diseño presentado para posibles trabajos futuros.

2 Estado del arte

Esta parte del trabajo se corresponde con el estado del arte, en la que se desarrollaran las bases teóricas sobre las que se ha apoyado a la hora de su realización.

2.1 Biosensor enzimático

Un biosensor es aquel sensor que se encarga de medir alguna propiedad química o biológica. En los biosensores enzimáticos el elemento que se va a medir es una enzima determinada [2]. Una enzima es una proteína que actúan como catalizadores para llevar a cabo reacciones químicas en los seres vivos. Una cualidad de las enzimas es que para una reacción química se necesita una enzima específica, esta cualidad hace que los biosensores enzimáticos tengan una alta selectividad ya que se encargaría de medir la cantidad de una determinada enzima en un medio donde se encuentran otros compuestos.

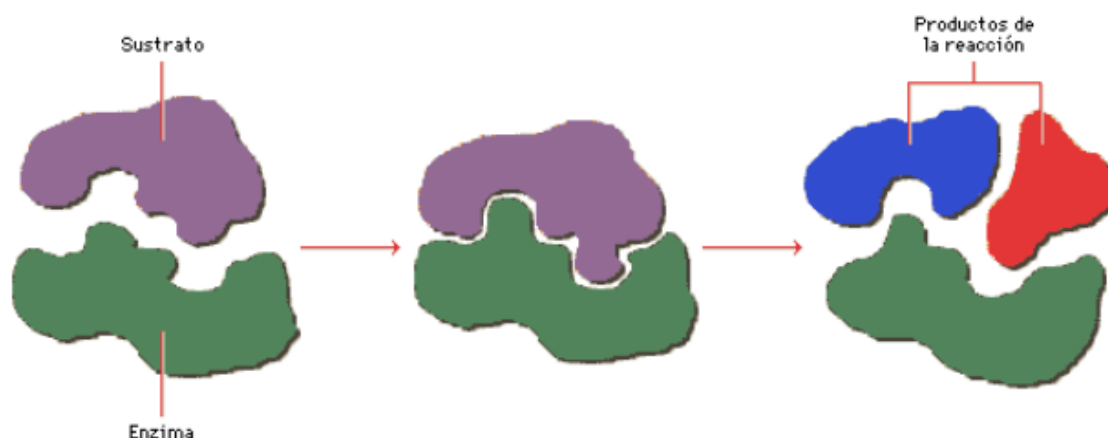


Figura 2-1: Funcionamiento Enzima

Existen diferentes tipos de biosensores ya sean ópticos, piezoeléctricos, térmicos o electroquímicos. Estos últimos son los que hacen uso de electrodos como transductor y los que se van a usar en este trabajo debido a su gran selectividad y sensibilidad, y que permiten medir directamente la señal eléctrica, producto de la reacción química.

2.2 Celda electroquímica

Dispositivo que produce una corriente eléctrica a partir de la energía procedente de una reacción química o viceversa [4], [19]. Estas reacciones químicas se llaman reacciones electroquímicas o reacciones redox (reducción-oxidación), en las que se produce una transferencia de electrones entre los reactivos produciéndoles cambios en sus propiedades. Generalmente, están formados por dos electrodos que permiten la reacción redox, el ánodo y el cátodo. El ánodo es el electrodo donde se produce la oxidación mientras que en el cátodo se produce la reducción. Los electrodos están hechos de materiales conductores o semiconductores, como metales, grafitos o polímeros conductivos.

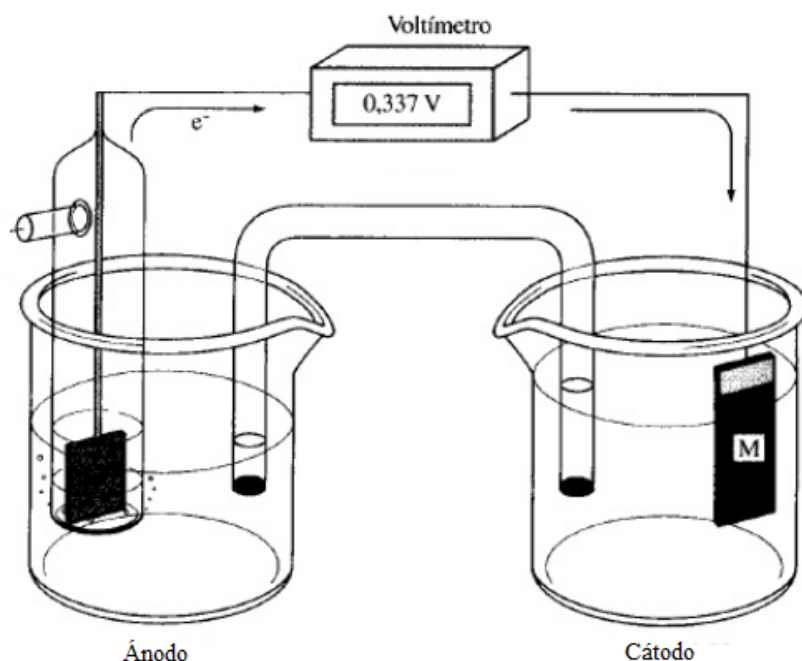


Figura 2-2: Celda electroquímica

En nuestro caso, el ánodo se corresponderá con el electrodo de trabajo, tenderá a captar los electrones procedentes del elemento reductor, mientras que el cátodo será nuestro electrodo de referencia que cederá electrones al medio al suministrarle un potencial.

Por último, se añadirá un tercer electrodo, el electrodo auxiliar, cuya función será evitar la polarización del electrodo de referencia y provocando que el potencial fijado inicialmente se mantenga constante. No participa en la reacción química, está hecho de un material inerte (p.ej. oro o plata), por él circulará la corriente que polarizaría el electrodo de referencia evitando que este se polarice y manteniendo constante el potencial entre los electrodos de trabajo y de referencia [17].

En este proyecto el tipo de celda que se va a utilizar es del tipo galvánica en la que se medirá la concentración de los analitos midiendo las variaciones en las corrientes que circulan a través de los electrodos de la celda.

Una celda galvánica aprovecha la energía liberada por una reacción redox para generar una corriente, es decir, se vale del flujo de electrones que se crea en la transferencia de estos entre los electrodos para producir una corriente eléctrica.

2.3 Métodos de análisis electroquímicos

Son un grupo de métodos analíticos cuantitativos que se basan en las propiedades eléctricas de un compuesto químico cuando se encuentra en una celda electroquímica [4]. Estas técnicas se caracterizan por tener unos límites de detección muy bajos y de proporcionar bastante información que caracteriza al sistema químico.

Las ventajas de este tipo de métodos analíticos son:

- Medidas electroquímicas para un tipo específico de oxidación
- Instrumentación de medida suele tener un coste bajo
- Proporcionan información sobre las actividades que se producen dentro de las concentraciones

En resumen, los métodos de análisis electroquímicos se encargan de estudiar las interacciones entre los compuestos químicos con los fenómenos eléctricos.

2.3.1 Potenciometría

Para llevar a cabo las mediciones utilizan celdas electroquímicas en las que la corriente que circula por ellas es despreciable. Esta técnica se usa para medir las concentraciones de iones utilizando el potencial que recogen los electrodos. Estos electrodos se encuentran libres de interferencias dando un medio para realizar las medidas para cuantificar una determinada concentración.

La potenciometría necesita de un electrodo de referencia, un electrodo indicador o de trabajo y un dispositivo para medir el potencial.

En el electrodo de referencia hay un potencial conocido y constante, en el electrodo indicador o de trabajo el potencial varía debido a cambios de la muestra. Estas variaciones o diferencias de potencial indican los cambios que se producen en la muestra, lo que significa que se miden los cambios de potencial entre los dos electrodos.

Antes de empezar a medir el electrodo indicador debe estar en equilibrio con la disolución, el tiempo que necesite para esto afectará a la precisión y sensibilidad de la medida.

Los instrumentos necesarios para medir el potencial de la celda deben tener una resistencia mayor que la que tiene la celda electroquímica, sino los valores de las medidas tendrían errores. Los dos dispositivos más empleados son el potenciómetro y el voltímetro electrónico de medida plana.

Para determinar la concentración de una sustancia a través de técnicas potenciométricas es rápido y sencillo, solo se requiere comparar el potencial del electrodo de trabajo con el potencial cuando se sumerge en disoluciones patrón.

2.3.2 Culombimetría

Este método presenta una selectividad, sensibilidad y rapidez moderada, aunque para determinados casos es el método más preciso a nivel químico presentando un error en las medidas de décimas por ciento. A diferencia de otras técnicas electroquímicas, la culombimetría no necesita un proceso previo de calibración.

La culombimetría son aquellos métodos en los que se analiza la cantidad de electricidad, en culombios, necesarios para cambiar el estado de oxidación o reducción de un analito [4]. La ventaja principal es que a partir de constantes físicas que son conocidas se puede deducir la proporción entre el peso del analito y la cantidad de culombios necesarios. Por ello no hace falta un proceso de calibración.

En muchos casos estos métodos son más precisos y rápidos que las técnicas volumétricas o gravimétricas, y se pueden adaptar de manera sencilla a procesos de automatización.

Para estos tipos de análisis existen dos técnicas:

- Potenciostática: se mantiene un potencial constante en el electrodo donde sucede la reacción redox. La corriente, medida con un integrador, al principio es alta pero disminuye conforme se produce la reacción en el analito.
- Amperostática: se mantiene constante la señal eléctrica hasta que la reacción redox finalice. Midiendo la cantidad de electricidad necesario para que se haya completado la reacción a través de la intensidad de corriente y el tiempo que ha circulado.

Un aspecto necesario para llevar a cabo con éxito estos métodos es que la corriente eléctrica y el analito deben interaccionar plenamente.

2.3.3 Voltamperometría

Esta es la técnica usada en este trabajo son un conjunto de técnicas electroquímicas en las que las medidas se basan en la intensidad de corriente que fluye a través de una celda electroquímica cuando se les aplica un potencial a sus electrodos. Este potencial se aplica con la intención de polarizar el electrodo indicador o de trabajo. La diferencia principal con la coulombimetría es que en esta última todo el analito cambia a otro estado mientras que en esta solo se usa una parte mínima del analito.

La voltamperometría es usada tanto en la química inorgánica como en la bioquímica para el análisis de los procesos redox en distintos medios o en los procesos de transferencias de electrones entre electrodos. Además, en los últimos años estas técnicas están ganando una mayor popularidad debido, por un lado, al bajo coste de los componentes requeridos y por otro al desarrollo de modificaciones en las técnicas que aumentaban la sensibilidad y selectividad.

Dentro de esta existen distintas subclases, destacando la amperometría y sobre la voltamperometría cíclica sobre las demás.

Tanto las técnicas de amperometría como de voltametría cíclica se emplean para captar un tipo determinado de partículas dentro de una solución. Sin embargo, la técnica de voltametría mejora la selectividad ya que para algunas mediciones donde se está trabajando con potenciales muy bajos. Ante esto las técnicas amperométricas ofrecen una medición constante mientras que la otra técnica necesita un ciclo de tiempo hasta completar una medida.

2.3.3.1 Amperometría

Técnica derivada de la voltamperometría en la que el potencial aplicado a la celda electroquímica se mantiene constante en el tiempo midiendo la corriente generada por la oxidación o reducción del analito [14]. En esta técnica se utiliza una celda con una configuración de tres electrodos en la que la reacción redox y su posterior medición tiene lugar en el electrodo de trabajo.

Antes de iniciar el proceso de medición hay que realizar una calibración que consiste en estabilizar la corriente de los electrodos. Para ello se usará una muestra con una cantidad conocida del analito a medir con la que se estabilizará la corriente obteniendo un valor base de referencia. Tras esto se introducirá la muestra en cuestión para medir su valor de concentración e interpolarlo al valor base obtenido antes midiendo la diferencia entre ambos. Este proceso de calibrado se hará siempre al inicio de cada proceso de medición.

La amperometría es una técnica muy sensible a cambios en el estado de la concentración, donde, con los medios adecuados, se pueden llegar a medir concentraciones del orden de nanoamperios.

2.3.3.2 Voltamperometría cíclica

Se utiliza una celda electroquímica con tres electrodos en la que se mide la corriente que fluye por el electrodo de trabajo cuando a este se le aplica un potencial con una forma triangular, como se muestra en la siguiente figura [4]:

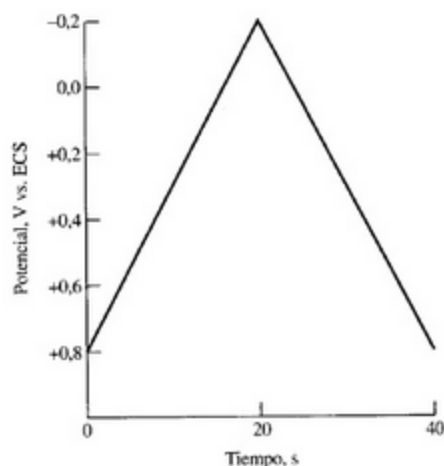


Figura 2-3: Voltametría cíclica

Al aplicarle potencial de esta manera se analiza la reacción del compuesto cuando se le aplica un potencial menor hasta valores mayores de manera periódica. Los intervalos elegidos son los que se corresponden con aquellos en los que se produce el proceso de oxidación del analito. Los ciclos de excitación van desde 1ms o menos hasta 100ms. En la figura anterior es de 40ms. Los resultados obtenidos se llaman voltamogramas.

El uso principal de esta técnica es como aplicación para diagnósticos y estudios básicos de procesos electroquímicos en determinadas condiciones. Es una herramienta muy usada en las reacciones redox para estudiar los mecanismos y las velocidades de los procesos de reducción y oxidación.

2.4 Potenciostato

El potenciostato es el dispositivo encargado de controlar todo el proceso de medición de la muestra dentro de la celda electroquímica. En este trabajo como se ha dicho anteriormente la técnica electroquímica que se va a usar para hacer las mediciones de las concentraciones de analitos es la amperometría, por lo que el potenciostato se encargara de mantener constante el potencial entre los electrodos de trabajo y de referencia, y también de medir la corriente que circula entre estos. Estas son las dos principales funciones que va a llevar a cabo el potenciostato [9].

Un diseño de un potenciostato de tres electrodos estándar puede ser el siguiente:

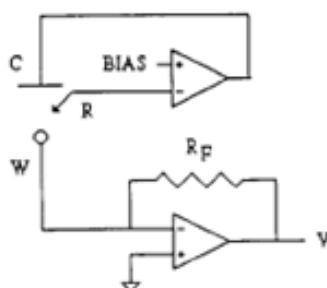


Figura 2-4: Potenciostato Básico

Cuya función de salida sería la siguiente:

$$V = \frac{I_{celda}}{R_F}$$

Donde ' V ' es la tensión de salida e ' I_{celda} ' la corriente eléctrica que circula entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia.

Un potenciostato estándar compara el potencial entre los electrodos de trabajo y referencia con un potencial preestablecido, llamado potencial BIAS. Las variaciones de este potencial, debido a cambios que pueden ocurrir a consecuencia de la reacción química, es amplificada y aplicada al electrodo auxiliar, para así mantener constante el voltaje entre los electrodos de trabajo y auxiliar.

Para tener una mayor facilidad y flexibilidad a la hora de trabajar en distintos rangos de medidas se usará un DAC, controlado por un microcontrolador, para proporcionar el potencial BIAS necesario. Por último, para procesar la señal de salida del potenciostato se usará un ADC que llevará esta señal al microcontrolador para interpretar los resultados.

En resumen, el potenciostato será el encargado de iniciar la reacción, suministrando un potencial constante a los electrodos, de medir la señal eléctrica del electrodo de trabajo, donde se produce la reacción, y de interpretar los resultados para el usuario.

2.5 Principales diseños de potenciostatos

A continuación, se analizarán algunos diseños de potenciostatos que se han estudiado con el fin de coger ideas para proponer un primer diseño.

2.5.1 Diseño de un potenciostato de bajo coste

En el artículo [3] se presenta los criterios y consideraciones a la hora de diseñar un potenciostato barato cuando se va a utilizar la voltametría cíclica. El diseño propuesto es de los más usados entre los distintos autores [5], [8], [9], [11],[13], [15] y es el siguiente:

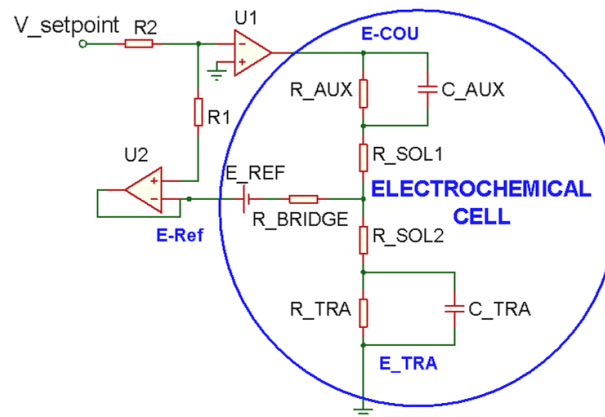


Figura 2-5: Potenciostato de bajo coste

El potenciostato estaría formado por las etapas de amplificación U1 y U2, el resto del diseño pretende simular el comportamiento de la celda electroquímica con tres electrodos. La etapa U1 mantiene el potencial constante entre los electrodos de referencia y de trabajo mientras que la etapa U2 evita que circule corriente entre el electrodo auxiliar y el de referencia.

La última etapa de este circuito es la de medida que consiste en un conversor I/V conectada al electrodo de trabajo.

El principal problema que presenta este diseño, y los potenciostatos en general, es el generado por el ruido a la señal medida, debido a las no linealidades que introducen las etapas de amplificación o debido a las condiciones de trabajo del entorno, lo que se traduce en una sobre-oscilación en la señal eléctrica que se mide. Para paliar los efectos de estas interferencias se propone introducir un filtro paso bajo en el conversor.

2.5.2 Potenciostato Diferencial

Normalmente los potenciostatos de bajo consumo ‘single-ended’ son incapaces de detectar determinados analitos, pues el potencial que necesitan para iniciar la reacción redox es mucho mayor que la que el potenciostato puede suministrar a los electrodos. Por ello en este paper, [1], se propone un potenciostato diferencial, frente al ‘single-ended’, que solucionará esta limitación permitiendo abarcar un mayor rango de trabajo, dotando al potenciostato de una mayor flexibilidad para distintos tipos de mediciones.

Un potenciostato ‘single-ended’ tiene el siguiente aspecto:

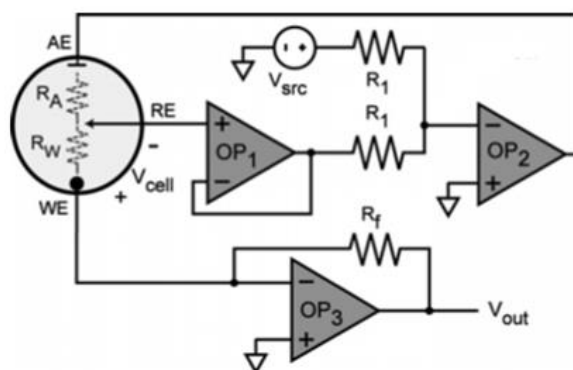
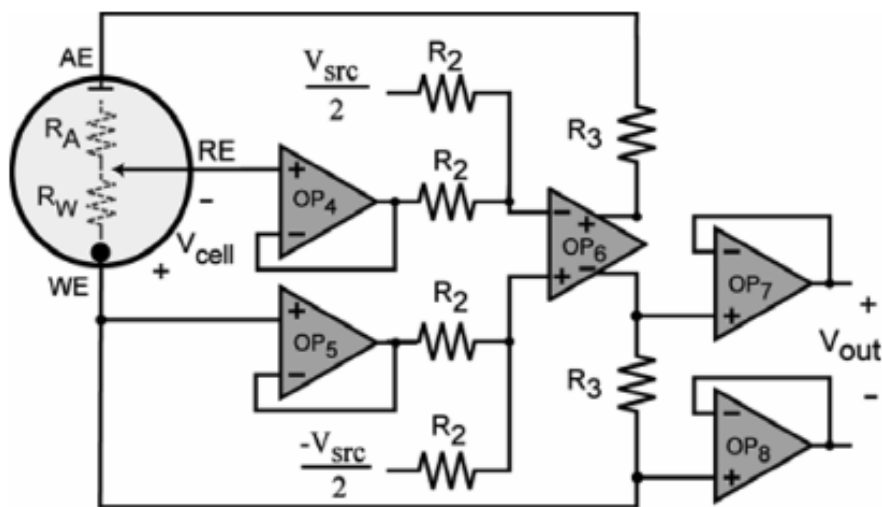


Figura 2-6: Potenciostato ‘Single-ended’

Debido a que el potenciostato ‘single-ended’ es incapaz de realizar análisis de interés en donde el potencial necesario para la reacción redox, es decir, para que comience el proceso de oxidación de la sustancia es mayor que el voltaje que el potenciostato puede entregar a los electrodos, se desarrolla un potenciostato diferencial como el de la siguiente imagen:



Permite un mayor rango de mediciones con un voltaje de alimentación de 1.8v. Este diseño da un control dinámico de CE y WE, esto dobla el rango de tensiones de la otra versión. Por contrapartida en este tipo de potenciostatos, el voltaje de salida tiene una variación de la tensión offset el doble que en la otra versión.

2.5.3 Potenciostato para mediciones de glucosa usando un ‘espejo de corriente’

En este paper [10] se implementa un potencióstato utilizando un espejo de corriente para las mediciones.

Estos diseños se pueden dividir en dos circuitos menores, el primero, el que garantiza un potencial constante entre los electrodos de trabajo y de referencia, y el segundo sub-circuito, se encarga de generar una corriente idéntica a la que circula por la celda. Este diseño se puede ver en la siguiente imagen:

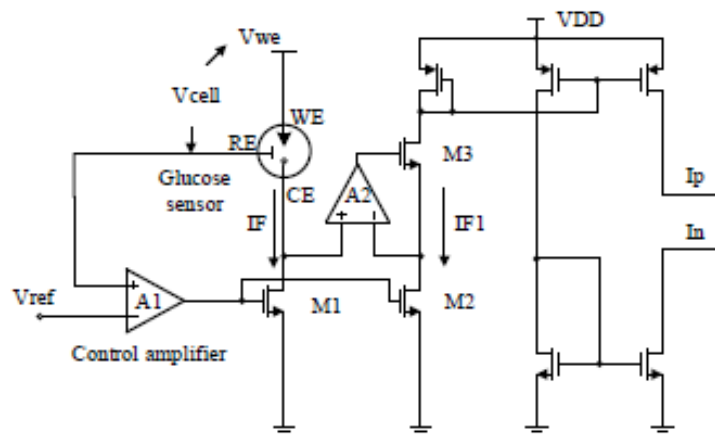


Figura 2-8: Espejo de corriente en un potencioestado

En el diseño se pueden apreciar las dos partes mencionadas antes, que tiene, en donde se ‘copia’ la corriente de la celda, I_F , al segundo sub-circuito, I_{F1} . Esta nueva señal se convierte en una señal de corriente diferencial de salida, I_p e I_n .

Esto último de tener una señal de corriente diferencial como salida provocará que se solucionen las interferencias producidas por el modo común.

Este diseño presenta varias ventajas, al usar pocos componentes activos y pasivos se genera menos ruido, tiene un menor consumo de energía y, por último, la topología que se usa para medir la corriente no tiene problemas de estabilidad. Aunque esta topología es más compleja que otras.

2.5.4 Potenciostato con el electrodo auxiliar a tierra

En este trabajo [12] se hace una comparación entre las distintas configuraciones que puede tener un potenciostato dependiendo de qué electrodo está conectado a tierra: trabajo, referencia o auxiliar. Aquí se va a centrar en la configuración que pone el electrodo auxiliar a tierra, esta es la menos utilizada actualmente y sin embargo ofrece algunas ventajas sobre las otras configuraciones.

Los dos problemas que con este diseño se superan son, por un lado, las interferencias electromagnéticas externas que pueden surgir de no conectar apropiadamente el electrodo de trabajo a tierra para el rango de frecuencias de interés y, por otro lado, el uso de un conversor I/V en el electrodo de trabajo para medir la corriente de la celda puede introducir una resistencia parasita en la medida, lo que conlleva a un desplazamiento de la señal medida.

El diseño que se presenta es el siguiente:

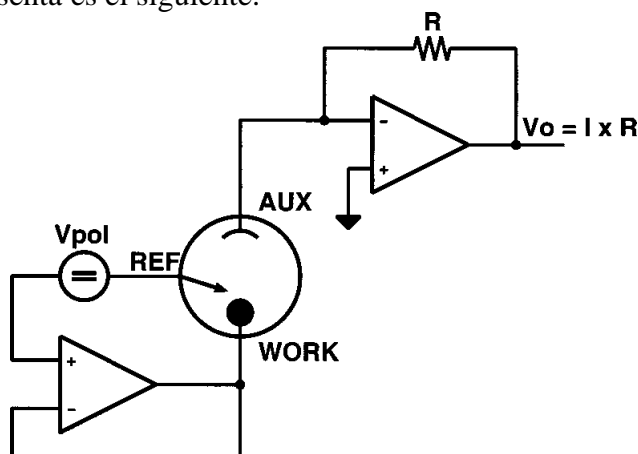


Figura 2-9: Potenciostato con electrodo auxiliar a tierra

Conectando el electrodo de trabajo a la salida de un seguidor de tensión, que al tener una impedancia de salida muy baja contribuye a disminuir la interferencia que puede introducir este electrodo. Para medir la corriente de la celda se implementa un conversor I/V en el electrodo auxiliar conectado virtualmente a tierra. Esto hace que no haya interferencias entre la resistencia serie y la resistencia parasita del electrodo auxiliar.

3 Diseño HW del potenciostato

En este punto del proyecto se presenta el diseño de la topología de potenciostato que se ha elegido. Dando, en primer lugar, un planteamiento inicial donde se explicarán las razones de dicha elección y se echará un primer vistazo a las características que más sobresalen.

Una vez hecho un primer contacto con la topología elegida se procederá a realizar un análisis más en profundidad de cada bloque que formaría el circuito completo. Para ello, se dividirá en bloques según la función que vayan a realizar y se verá que componentes serían necesarios para cada parte. Con lo que se hará un estudio, y posterior selección, de los dispositivos que se podrían emplear en la implementación del potenciostato.

Otro tipo de análisis que se ha hecho en esta sección ha sido qué protocolo usar para la comunicación tanto interna entre los componentes que controlara el microcontrolador como la externa entre el microcontrolador y periféricos externos.

3.1 Planteamiento inicial del diseño.

Como se ha comentado anteriormente el objetivo de este trabajo es el diseñar un potenciostato funcional que va a permitir medir el nivel de una concentración de una sustancia específica dentro de una disolución/muestra química.

El diseño del potenciostato que se ha elegido para este trabajo es el conformado por un conversor I/V:

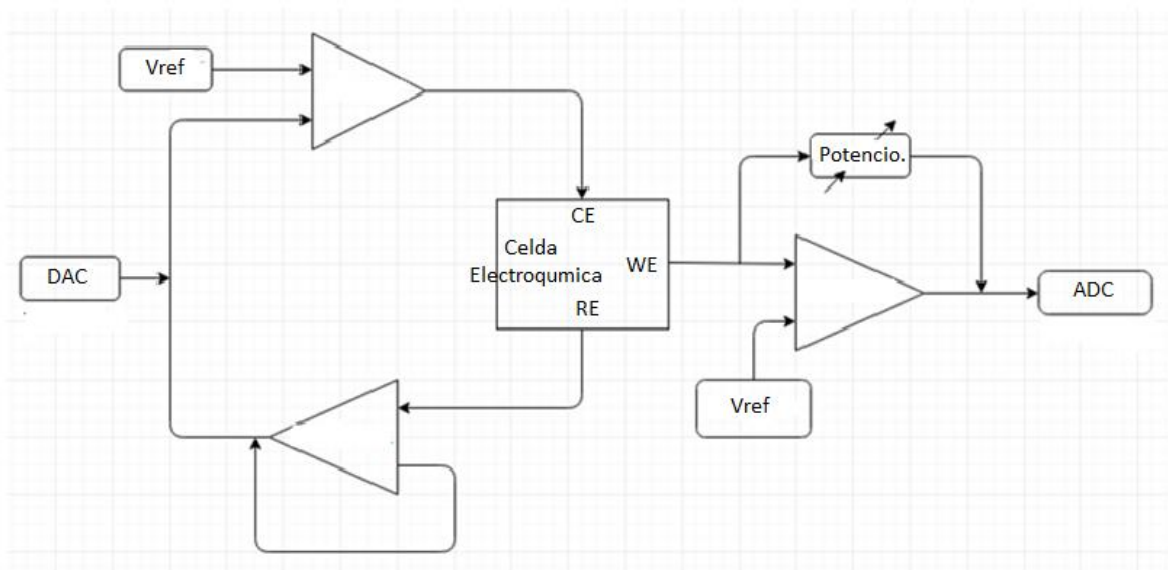


Figura 3-1: Esquemático del potenciostato

Los motivos de la elección de esta topología para el potenciostato son los siguientes:

- Diseño sencillo,
- Fácil de implementar,
- Alta portabilidad,
- Gran flexibilidad en cuanto componentes a usar,
- Bajo coste.

Otro motivo por el que se ha elegido esta topología ha sido porque la mayoría de trabajos y artículos que se han estudiado la recomiendan a la hora de diseñar un potencióstato sencillo y con buenos resultados [2], [6], [7], [8], [11], [12],[13], [15].

La siguiente imagen del esquemático del potencióstato muestra en detalle la alimentación que tendrá cada componente que lo conforma:

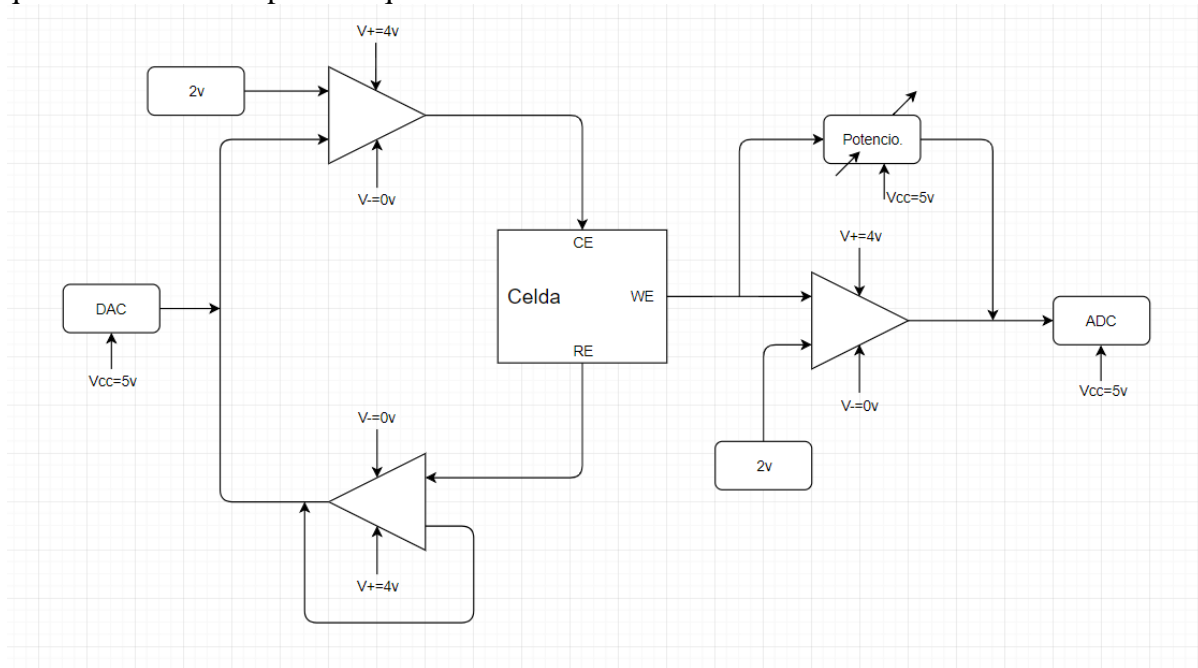


Figura 3-2: Diseño de potencióstato con detalle de las alimentaciones

Como se puede observar en la imagen anterior la tensión de referencia que se tendrá en las medidas será de $2v$, esto surge a la necesidad de medir corrientes en ambos sentidos. En vez de trabajar en el rango de $-2v$ a $2v$ se trabajará en el rango de $0v$ a $4v$ siendo $2v$ el punto medio que mostrara si la corriente medida va en un sentido u en otro. Esta particularidad del diseño surge debido a la necesidad de medir corrientes tanto positivas como negativas.

Para controlar todo este proceso de calibrado, toma de medidas y presentación de datos se usará un microcontrolador que se implementará y configurará para que controle los componentes que realizan estas tareas. Para ello, se hará uso del protocolo de comunicaciones I2C, para el control de los componentes internos que forman el potencióstato, y del protocolo USB para programar dicho microcontrolador. Por esto, uno de los requisitos que deben cumplir los dispositivos electrónicos es que posean interfaz de comunicaciones I2C.

3.2 Elección de componentes

Algunos de los parámetros a tener en cuenta a la hora de hacer la elección de los componentes serán los siguientes:

- Corriente de polarización (BIAS), pequeña cantidad de corriente que se genera a las entradas del operacional, debido a las no linealidades de este, y que se convierte en voltaje debido a las resistencias interna. Esta corriente, por lo tanto, influenciará el comportamiento del circuito.
- Impedancia de entrada, por lo general se buscará que sea lo más alta posible para intentar simular que la corriente a las entradas del operacional sea lo más baja posible.

- Factor de rechazo en modo común (CMRR), parámetro típico de los amplificadores operacionales que cuantifica la capacidad del dispositivo de rechazar las señales de modo-común, es decir, aquellas que aparecen en fase en ambas entradas del operacional.

Problemas que pueden surgir:

- Sobre oscilación o inestabilidad en las mediciones, cuyo origen puede deberse a las no linealidades que pueden introducir los AOs, para paliar estos efectos se estudiará la inclusión de filtros a nivel HW y nivel SW para ‘suavizar’ la señal de salida,
- Escoger el rango de corrientes a medir correctamente, como se ha visto en las simulaciones el rango de corrientes en el que se va a trabajar es muy pequeño y requiere de un ajuste muy específico a la hora de configurar en los componentes electrónicos,
- Aparición de ruido en las mediciones, se deben tomar las precauciones y medidas necesarias a la hora de diseñar el circuito en la placa PCB.

Antes de empezar a ver los distintos componentes que formaran el diseño, se explicaran los protocolos de comunicación que se han usado para la comunicación entre dispositivos internos y comunicación externa.

3.2.1 Protocolos de comunicación

Descripción de los protocolos usados para la comunicación entre los distintos dispositivos que conforman el trabajo, tanto internos como externos.

La comunicación interna del diseño consistirá en la comunicación que habrá entre los componentes analógicos y el microcontrolador, pues será este último el encargado de mandar y recibir los datos que configuren el resto de los componentes. Para nuestro caso se usará enviar datos y poder configurar el DAC o el potenciómetro, y para recibir datos provenientes del ADC.

Los dos protocolos más usados para este propósito son el protocolo Inter-Integrated Circuito (I2C) y el protocolo Serial Peripheral Interface (SPI). A continuación, se compararán las características más destacadas de ambos:

- I2C necesita dos líneas, la de datos (SDA) y la de reloj (SCL) mientras que SPI necesita tres (MOSI, MISO, CLK)+n líneas, donde n es el número de dispositivos que controla,
- Ambos protocolos utilizan la relación maestro esclavo, en I2C el maestro controla varios esclavos, mediante direcciones que le asigna, en SPI la relación maestro-esclavo se lleva a cabo mediante líneas,
- I2C tiene mayor flexibilidad en cuanto voltaje de alimentación,
- SPI es full-duplex, tiene líneas para enviar y recibir datos. I2C es half-duplex,
- Para añadir dispositivos, I2C asigna direcciones únicas a cada dispositivo, SPI necesita añadir líneas extras para conectarlos.

En resumen, I2C tiene una mayor flexibilidad a la hora de realizar las conexiones entre dispositivos, en cambio, con SPI se logra una mayor velocidad de comunicación debido al uso de salidas push-pull a cambio de introducir más líneas.

Por ello se ha elegido el protocolo de comunicaciones I2C, debido a su fácil integración en la topología seleccionada con el resto de los componentes al usar solo dos líneas (SDA y

SCL) además de su sencillez para usarlo y que, en este caso, el maestro será el microcontrolador y los esclavos serán los dispositivos mencionados anteriormente.

Por otro lado, para la comunicación externa se ha elegido directamente el protocolo Universal Serial Bus (USB) por ser el protocolo más popular y más extendido a la hora de establecer una comunicación estable y segura entre periféricos o terminales.

Al igual que los protocolos descritos antes el protocolo USB se basa en una relación maestro-esclavo, en la que el maestro será el PC y el esclavo será el microcontrolador. Algunas características adicionales de este protocolo son las siguientes:

- Alta velocidad de transferencia de datos (USB3.0 --> 600MB/s),
- Utilizado como estándar de comunicación para multitud de periféricos,
- Integración sencilla, solo requiere de 4 líneas (Vbus, D+, D-, GND).

3.2.2 Alimentación del potencióstato

Todos los componentes que forman el circuito funcionaran en un rango de tensiones entre 5v y 0v. La tensión de entrada que necesitará el circuito como alimentación será de 5v y el resto de tensiones necesarias se conseguirán mediante el uso de reguladores. El esquemático que representaría la alimentación que tendrá el diseño es el siguiente:

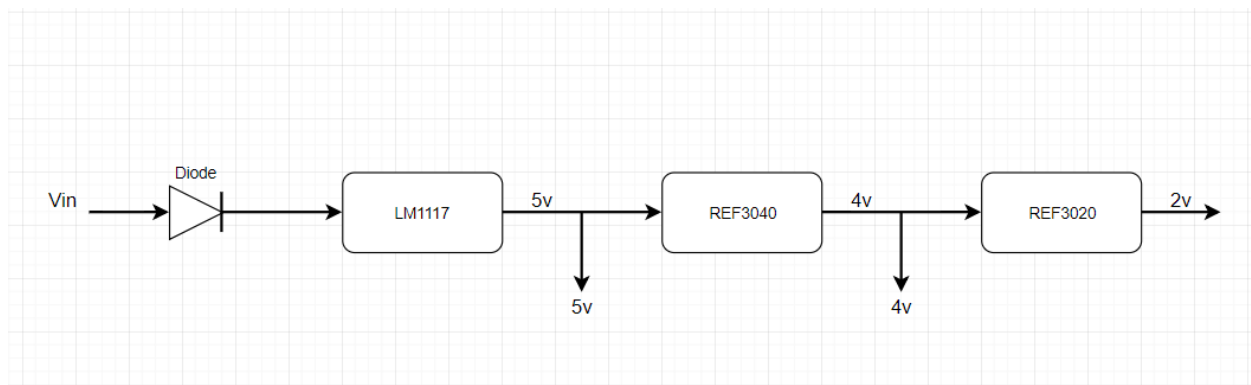


Figura 3-3: Etapa de alimentación

El regulador LM1117 se ha utilizado como medida de seguridad para fijar a 5v la tensión de entrada final que alimentará tanto al microcontrolador como a algunos de los componentes que lo necesiten. Algunas de las características de este regulador son las siguientes:

- Provee un voltaje de salida fijo de 5v,
- Alta estabilidad a la salida añadiendo un condensador polarizado,
- Fácil implementación.

Además del regulador para asegurar una tensión de 5v de alimentación, se ha introducido un diodo a la entrada de este como medida adicional de protección frente a tensiones negativas. Para conseguir las tensiones de 4v y 2v se han utilizado los reguladores REF3040 y REF3020, respectivamente. Ambos pertenecen a la misma familia de reguladores de Texas Instruments. Sus características son las siguientes:

- Alta precisión, 0.2% de error de salida,
- Baja corriente quiescente, 42uA,
- Fácil implementación.

Para aumentar la estabilidad de los reguladores se han añadido una serie de condensadores polarizados en sus respectivas conexiones de entrada y salida, tal y como aconsejan hacer en sus hojas de datos.

3.2.3 Etapa de medición: conversor I/V

En esta etapa del potenciostato se llevará a cabo la detección de variaciones en la corriente que circula a través del electrodo de trabajo al sumergirlo en la muestra.

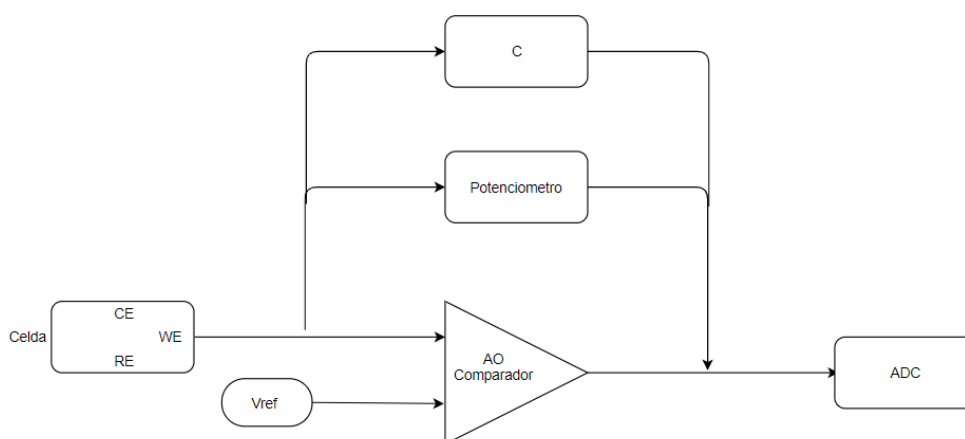


Figura 3-4: Bloque Conversor I/V

En este bloque se medirá las variaciones que se produzcan en la resistencia interna del electrodo de trabajo al sumergirlo en la muestra. A consecuencia de esta variación se generará un corriente que mediante el conversor I/V se transformará en la tensión de salida que recogerá el ADC. Además, la otra función que llevara a cabo este bloque es la de fijar la tensión del electrodo de trabajo al voltaje de referencia.

La tensión de salida que le llegará al conversor analógico-digital vendrá dada por ' V_{out} ' cuya expresión sería:

$$V_{out} = -I * R$$

Donde ' I ' es la corriente que atraviesa el potenciómetro, proveniente de la celda electroquímica y ' R ' es el valor de la resistencia que hay en el potenciómetro.

El bloque ' V_{ref} ' representa la tensión de referencia que se le va a suministrar al potenciostato y eligiendo una tensión de referencia igual a 2v, en lugar de referenciarlo a 0v por los motivos que ya se explicaron en los puntos anteriores.

Debido a esto la tensión de salida que le llega al conversor pasará a ser:

$$V = -I * R + 2$$

La inclusión de un condensador en paralelo al potenciómetro es debido a que reducirá la sobre-oscilación en las mediciones al funcionar como un filtro paso bajo. Datos filtro:

$$f_c = \frac{1}{2\pi * R * C}$$

R valor de la resistencia que da el potenciómetro, 10kΩ

C valor del condensador en paralelo, 10uF

Con estos valores la frecuencia de corte del filtro, Fc, sería: 160 Hz

Los dispositivos que serán necesarios para este bloque del potenciómetro serán un amplificador operacional, un potenciómetro y un conversor analógico-digital:

- **AO del conversor I/V.**

Encargado de llevar a cabo la conversión de corriente en el conversor I/V además de fijar una tensión en el electrodo de trabajo por lo que tiene un importante papel en el sistema completo. Los criterios que se han tomado para elegir el AO son los siguientes:

- Corriente polarización (BIAS) baja,
- Impedancia de entrada alta,
- CMRR (factor rechazo modo común) lo más alto posible.

Entre los modelos que se han estudiado y comparado destacan los de la siguiente tabla, donde se ha marcado de un tono más oscuro aquel por el que finalmente se optó:

Nombre	Imp. Entrada	BIAS	CMRR	Ruido	Alimentación	Fabricante
LMP7721	Muy alta*	20 fA	100 dB	8 nV/√Hz	+2 +5v	Texas Instruments
OPA544T	10 ¹² Ω	15pA	106 dB	36 nV/√Hz	±10 ±35v	Texas Instruments
TLE2061AC	10 ¹² Ω	2nA	82 dB	40 nV/√Hz	±3.5 ±18v	Texas Instruments
TLC277	Muy alta*	0.6pA	80 dB	25 nV/√Hz	+5 +10v	Texas Instruments

*no viene el valor específico en las hojas de componentes

Tabla 3-1: Elección AO del conversor I/V

LMP7721 [26]: este amplificador tiene una de las corrientes BIAS más bajas entre amplificadores, que es el parámetro más importante en este caso, además, tiene un nivel de ruido bajo. Por último, aunque no se indica en su hoja de datos que la impedancia de entrada que posee es bastante alta.

- **Componente: potenciómetro.**

Permitirá ajustar un valor de resistencia adecuado para un rango de trabajo determinado. Así según el valor con el que se programe, el potenciómetro, las mediciones que se hagan para una concentración específica será más estable según el rango de trabajo en el que se encuentre. Este componente, dota al potenciómetro de una mayor flexibilidad pudiendo ajustar dicha banda de trabajo y dando una mejor calidad en los datos. Criterios de elección:

- Interfaz I2C,
- Alta resolución,
- Valor máximo que tiene.

Esta tabla muestra algunos modelos que se han comparado, en donde se marca más oscuro el potenciómetro finalmente elegido:

Nombre	Valor Max	Resolución	Interfaz	Alimentación	Fabricante
AD5241	10kΩ	256 posiciones	I2C	2.7v to 5.5v	Analog Device
MCP4261	100k Ω	257 posiciones	SPI	2.7v to 5.5v	Microchip
TPL0401x	10 k Ω	128 posiciones	I2C	2.7v to 5.5v	Texas Instruments
AD5272	100k Ω	1024 posiciones	I2C	2.7v to 5.5v	Analog Device

Tabla 3-2: Elección potenciómetro

AD5241 [20]: potenciómetro de Analog Device, utilizado en aplicaciones que requieran una conversión voltaje a corriente. Las 256 posiciones que tiene para configurarlo permitirán obtener un valor de resistencia lo suficientemente preciso para que la calidad de las medidas sean buenas

- **Componente: Conversor Analógico-Digital (ADC).**

Servirá como el medio que convertirá la señal analógica de la salida del conversor I/V a una señal digital que enviará al microcontrolador a través de la interfaz I2C.

Criterios de elección:

- Alta resolución,
- Interfaz I2C,
- Bajo ruido.

Los ADCs que se han estudiado y comparado son los siguientes, resaltando el finalmente escogido:

Nombre	Resolución	INL	Alimentación	Interfaz	Fabricante
ADS1146	16 bits	0.5 LSB	+/- 2.125v 0v a 4.25v	SPI	Texas Instruments
ADS1114	16 bits	1 LSB	0v a 5.5v	I2C	Texas Instruments
ADS8513	16 bits	2 LSB	+/- 10v	SPI	Texas Instruments
ADS7823	12 bits	1 LSB	2.7v a 5v	I2C	Texas Instruments

Tabla 3-3: Elección ADC

ADS1114 [22]: ADC de alta precisión y de bajo consumo, que, junto que con la interfaz I2C que posee, se ajusta perfectamente a los requerimientos de este trabajo.

3.2.4 Etapa de control de electrodos

Encargada de controlar que se mantenga constante el diferencial de potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. Para ello se usará el electrodo auxiliar (CE)

que suministrara el flujo de corriente necesario para mantener el equilibrio entre le potencial de los otros dos electrodos. El esquema que tiene es el siguiente:

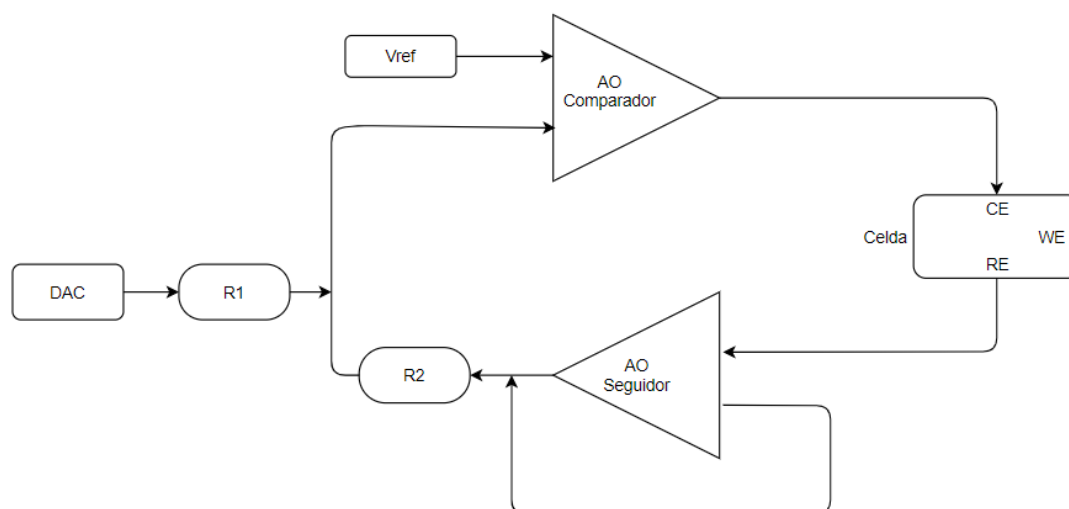


Figura 3-5: Bloque control de tensión de electrodos

La función de este bloque es, por un lado, mantener constante el diferencial de potencial entre los electrodos RE y WE, y, por otro lado, utilizar el electrodo auxiliar CE para proporcionar el flujo de corriente regular las posibles diferencias de potencial que puedan ocurrir a consecuencia de la reacción redox ocurre cuando se sumergen los electrodos en la muestra.

Los componentes forman este bloque son los siguientes:

- **Componente: AO Seguidor.**

Este amplificador conectado al electrodo de referencia se comportará como un seguidor de tensión que determinara la tensión de referencia que habrá en este electrodo además de evitar que se polarice debido a posibles corrientes negativas que se pueden generar. Criterios de elección:

- AO de tipo rail-to-rail
- Impedancia de entrada lo más alta posible
- Corriente BIAS baja

La tabla siguiente muestra todos aquellos AOs que se han comparado:

Nombre	Imp. Entrada	BIAS	Ruido	Alimentación	Fabricante
MCP6001	10¹³Ω	19nA	28 nV/√Hz	+1.8 a +6v	Texas Instruments
TLV2462	10 ⁹ Ω	25nA	16 nV/√Hz	+2.7v a +6v	Texas Instruments
OPA124	*	1pA	6-40** nV/√Hz	+/- 15v	Texas Instruments
OPA196	100 MΩ	5pA	15 nV/√Hz	±2.25v a ±18v	Texas Instruments

*El datasheet no muestra el valor.

**Varía según la frecuencia de trabajo

Tabla 3-4: Elección AO seguidor

MCP6001 [24]: AO diseñado para propósitos generales rail-to-rail con una impedancia de entrada alta y una tensión BIAS lo suficientemente pequeña para considerar insignificantes los errores por no linealidad.

- **Componente: AO Comparador.**

Amplificador conectado al electrodo auxiliar, este amplificador se encargará de mantener constante la diferencial de potencial entre los otros electrodos, para ello al detectar una alteración en este potencial suministrará la corriente necesaria para que vuelva a ser constante Criterios de elección:

- AO rail to rail,
- Con una alta ganancia,
- Alto valor de CMRR

Nombre	Ganancia	BIAS	CMRR	Alimentación	Fabricante
OPA363	100dB	1pA	90 dB	+1.8v a +5.5v	Texas Instruments
OPA4322	130dB	0.2pA	100dB	+1.8v a +5.5v	Texas Instruments
OPA4141	126dB	2pA	126 dB	+/- 18v	Texas Instruments
OPA145	123dB	2pA	140dB	±2.25v a ±18v	Texas Instruments

Tabla 3-5: Elección AO comparador

OPA145 [23]: amplificador rail to rail de bajo consumo y bajo ruido que según su hoja de datos es una buena elección cuando se emplea en aplicaciones de instrumentación médicas o sistemas de tests automáticos.

- **Componente: Conversor Digital-Analógico.**

Establece la tensión de referencia conocida a la que va a estar el electrodo RE, al utilizar un conversor digital-analógico dotará al sistema de una mayor flexibilidad de cara a poder trabajar con varios tipos de disoluciones pues a través del microcontrolador se podrá programar diferentes valores a su salida. Criterios de elección:

- Mayor resolución posible para una mayor precisión,
- INL mínimo, error de no linealidad mínimo,
- Interfaz I2C.

Esta tabla muestra algunos conversores que se han analizado:

Nombre	Resolución	INL	Alimentación	Interfaz	Fabricante
DAC8571	16 bits	0.25 LSB	2.7v a 5.5v	I2C	Texas Instruments
DAC8830	16 bits	0.5 LSB	2.7v a 5.5v	SPI	Texas Instruments
DAC80004	16 bits	1 LSB	2.7v a 5.5v	SPI	Texas Instruments
DAC7571	12 bits	1 LSB	2.7v a 5.5v	I2C	Texas Instruments

Tabla 3-6: Elección DAC

DAC8571 [21]: este conversor digital-analógico de Texas Instruments como se ve en la tabla anterior es el que posee el INL más bajo con una resolución de 16bits, además el factor que ha terminado de contribuir a la elección es que incorpora una interfaz I2C para su control, que es el protocolo empleado para el control de los dispositivos que forman el potenciómetro.

3.2.5 Elección del microcontrolador

Para controlar los componentes electrónicos implicados en cada uno de los procesos necesarios que permiten obtener las mediciones finales se utilizara un microcontrolador. Dicho microcontrolador se comunicará con los componentes en una relación maestro-esclavo mediante el protocolo de comunicaciones, seleccionado anteriormente, I2C. Los dispositivos con los que se comunicara serán el DAC, el potenciómetro y el ADC. Mientras a los dos primeros se hará una operación de envío de datos para configurarlos correctamente al tercero le solicitará los datos que le lleguen a la entrada. Básicamente los criterios que se han tomado para llevar a cabo esta elección es que posea las interfaces de comunicación siguientes:

- Posea interfaz I2C,
- USB

Ya que las operaciones que va a realizar son básicas no se necesitara mucha memoria y capacidad de procesamiento para llevarlas a cabo, por ello en principio la decisión se ha basado en las interfaces de comunicación que tenga.

La siguiente tabla muestra los distintos microcontroladores que se han analizado y comparado entre ellos, en donde se marca más oscuro el microcontrolador elegido:

Nombre	Fabricante	Alimentación	Memoria	Interfaces
MSP430FR2153	Texas Instruments	1.8v / 3.6v	16 kB	SPI-2 I2C-1
ATmega32U4	Microchip	2.7v / 5.5v	32 kB	SPI-2 I2C-1
ATmega48	Microchip	1.8v / 5.5	4 kB	SPI-2 I2C-1
TMS320F28020 'Piccolo'	Microchip	3.3v	32 kB	SPI-1 I2C-1

Tabla 3-7: Elección microcontrolador

ATmega32u4 [25]: es un microcontrolador de Atmel con arquitectura AVR que tiene un alto rendimiento a un bajo consumo. Soporta transferencias de datos a altas velocidades manteniendo la integridad de estos.

Es completamente compatible con el protocolo de comunicación USB 2.0, posee interfaz I2C y SPI. Además, posee una interfaz ISP (In-System Programming) que permitirá cargar sobre el microcontrolador el bootloader para programarlo desde el PC vía USB. El bootloader va a permitir configurar el microcontrolador de tal manera que se pueda trabajar con el bus I2C y los distintos componentes fácilmente.

3.3 Técnicas para reducir el ruido

Debido a que este tipo de sensores trabaja en un rango de corrientes cuyos valores son muy bajos hay que tener en cuenta una serie de consideraciones en el diseño del PCB para que el resultado que se obtenga sea lo más claro posible.

El uso de componentes

Las fuentes de donde se origina este ruido son las siguientes:

- Circuito integrado (IC) y pines I/O,
- Fuentes de alimentación,
- Ruido proveniente de osciladores.

Algunas técnicas que se han aplicado se han extraído de [16], [18] y son las siguientes:

- Se han separado regiones,
- Diseño usando un espacio mínimo,
- Pistas lo más cortas posibles y anchas,
- Giros de 45° en las pistas,
- Utilizar un plano para masa solo,
- Diferenciar entre plano masa digital y el analógico.

4 Desarrollo SW potencióstato

Todos los dispositivos se han configurado como se ha comentado anteriormente mediante I2C a través de los buses comunicación SDA (canal datos) y SCL (reloj). El microcontrolador que controlara los distintos componentes del potencióstato se le cargo, mediante la interfaz ISP, un bootloader de Arduino Leonardo debido a que es un entorno de programación conocido que facilitará esta parte del trabajo.

4.1 Configuración SW del potenciómetro

El proceso de configuración del potenciómetro empieza cuando el maestro envía la condición para que comience el proceso de escritura. Tras esto se envía el byte con la dirección del esclavo (0x2C) indicando además el tipo de operación que se va a hacer, en este caso de escritura.

Después empieza el proceso de escritura y configuración del potenciómetro, para configurar el modo estándar de funcionamiento se ha seguido la información que proporciona la hoja de datos:

S	0	1	0	1	1	AD1	AD0	R/W	A	A/B	RS	SD	O ₁	O ₂	X	X	X	A	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	A	P
Slave Address Byte									Instruction Byte								Data Byte											

where:

S = start condition

P = stop condition

A = acknowledge

X = don't care

AD1, AD0 = Package pin programmable address bits. Must be matched with the logic states at Pin AD1 and Pin AD0.

R/W = Read enable at high and output to SDA. Write enable at low.

A/B = RDAC subaddress select; 0 for RDAC1 and 1 for RDAC2.

RS = Midscale reset, active high.

SD = Shutdown in active high. Same as $\overline{\text{SHDN}}$ except inverse logic.

O₁, O₂ = Output logic pin latched values

D7, D6, D5, D4, D3, D2, D1, D0 = data bits.

Figura 4-1: Registros configuración potenciómetro

A/B será 0 ya que el modelo AD5241 [20] solo posee un solo registro RDAC a diferencia del modelo AD5242 que posee dos. Permitirá seleccionar donde se va a guardar los registros en caso de que sea necesario un posterior proceso de lectura.

RS midscale reset, registro activo alto.

SD shutdown bit, registro activo alto.

O1 y O2 registros que extras para otro tipo de operaciones que no son relevantes para este proyecto por lo que se dejan a 0.

El resto de los bits no afectan a la configuración por lo que se dejan a 0.

Tras la escritura que definiría el funcionamiento del potenciómetro, comenzaría la escritura del byte con el valor que va a fijar la resistencia que habría entre los pines A y B.

La siguiente captura muestra como se ha configurado mediante el I2C y utilizando el SW de Arduino el potenciómetro:

```

// AD5241 I2C direccion 0x2C(44)
#define POT 0x2C

//Configuracion POT
void conf_POT(){
    Wire.beginTransaction(POT);
    // Configuro 10kohmios
    Wire.write(0x00);//Bits configuracion
    Wire.write(0x10);//Bits de datos a escribir
    // Fin transimision
    Wire.endTransmission();
    delay(300);
}

```

4.2 Configuración SW del conversor ADC

Como se ha comentado anteriormente, el modelo de conversor analógico-digital elegido ha sido el AD1114 [22], debido entre otras cosas a que posee un canal de comunicación I2C y porque posee 16 bits de precisión.

La dirección I2C que tiene el conversor dependerá de donde se haya conectado el pin ADDR, esta característica permite alojar varios conversores para que trabajen en paralelo. En nuestro caso como se le ha asignado a GND la dirección I2C será 0x48.

Cuando se haya comenzado la comunicación con el conversor en modo escritura se tendrá que elegir el registro sobre el que se quiera operar. Posee un total de 4 registros:

- ‘Conversion register’, 0x00: registro donde se guardan los datos de la conversión
- ‘Config register’, 0x01: para cambiar el modo de funcionamiento del conversor
- ‘Lo_thresh’, 0x02: umbral inferior
- ‘Hi_thresh’, 0x03: umbral superior

Por lo que por ahora se elegirá modificar el ‘Config register’. Este registro está compuesto por dos bytes que definen el comportamiento del conversor

15	14	13	12	11	10	9	8
OS	MUX[2:0]			PGA[2:0]			MODE
R/W-1h	R/W-0h			R/W-2h			R/W-1h
7	6	5	4	3	2	1	0
DR[2:0]			COMP_MODE	COMP_POL	COMP_LAT	COMP_QUE[1:0]	
R/W-4h			R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-3h	

Figura 4-2: Registros configuración conversor ADC

De todos estos campos solo es interesante tener en cuenta los siguientes, el resto se dejarán con su valor por defecto de acuerdo a la hoja de datos:

- OS, bit 15: estado operacional del conversor, en escritura y poniéndolo a 1 indica que se va a realizar un proceso de conversión.
- MODE, bit 8: modo de conversión, escribiendo un 1 funciona en modo ‘single shoot mode’
- COMP_QUE, bits 1-0: activa o desactiva las funciones de comparador del conversor, poniendo ambos a 1, estas se desactivan

De acuerdo con lo descrito la configuración que se le ha programado al conversor sería la siguiente:

```
// ADS1114 I2C direccion 0x48(72)
#define ADC 0x48

void conf_ADC() {
    Wire.beginTransmission(ADC); //Byte direccion
    Wire.write(0x01); //Byte de configuracion 1
    Wire.write(0x81); //Byte de configuracion 2
    Wire.write(0x03); //Byte de configuracion 3
    Wire.endTransmission();
}
```

Una vez configurado el registro de configuración, se pasa a la etapa de lectura de la conversión.

Antes de proceder con esta lectura hay que configurar el ADC para indicarle que se va a operar con el registro de conversión (conversion register) y se va a escribir el valor 0x00, tras esto se para la comunicación I2C

Después, ya se inicia el proceso de lectura del registro de conversión, este está formado por 16 bits y en él se almacenan los datos de la conversión. Por ello se indica que se va a leer un total de 2 bytes de dicho registro, como se ve en la imagen inferior.

```
//////////////////////////////////ADC//////////////////////////////////
unsigned int data[2];
Wire.beginTransmission(ADC);
Wire.write(0x00);
Wire.endTransmission();

Wire.requestFrom(ADC, 2);

if (Wire.available() == 2)
{
    data[0]=Wire.read();
    data[1]=Wire.read();
}

uint16_t cambio=(data[0] * 256.0) + data[1];
float med_voltios=cambio*6.1438/32767;

Serial.print("Tension: ");
Serial.println(med_voltios,5);
Serial.print(" ");
// delay(500);
```

Se guardan ambos bytes en variables diferentes para que se desplazarán y sumarán hasta formar una única variable con el valor completo.

4.3 Configuración SW del conversor DAC

El conversor digital-analógico se va a encargar de suministrar la tensión BIAS al potenciómetro es el conversor DAC8571 [21], el cual se puede configurar mediante el bus de comunicaciones I2C. Para esta configuración se han llevado a cabo los siguientes pasos tal y como se explica en la hoja de datos del componente.

Cuando se inicia el proceso de escritura del bus I2C sobre los registros de configuración del conversor se tendrá un total de tres bytes a configurar, sin contar el byte con la dirección del componente, un byte para la configuración y otros dos para definir la tensión de salida que se desea.

El byte de configuración que marca como va a funcionar el conversor está compuesto por los siguientes bits:

0	0	Load 1	Load 0	0	Brcsel	0	PD0
---	---	--------	--------	---	--------	---	-----

Figura 4-3: Registros configuración conversor DAC

Los bits a configurar son los llamados ‘Load 1’ y ‘Load 0’. Estos designan el modo en el que se va a actualizar el valor de salida del conversor, el modo común de funcionamiento, en el que el dato de salida se transmite mediante el bus I2C, se configura poniendo el Load 1 a 0 y el bit de Load 0 a 1.

El resto de los bits se dejarán a 0 de acuerdo con la información de la hoja de datos del conversor.

Una vez configurado en el modo estándar de funcionamiento se transmiten los dos bytes que definen la tensión de salida del DAC en este caso el primer byte será 0x88 y el segundo 0x00. Con estos valores a la salida se tendrá una tensión de 2.205v.

```
// DAC8571 I2C direccion 0x4C(76)
#define DAC 0x4C

//Configuracion DAC
void conf_DAC() {
    Wire.beginTransaction(DAC);
    //Byte modo funcionamiento
    Wire.write(0x10);
    //Bytes configuracion salida
    Wire.write(0x88);
    Wire.write(0x00);
    Wire.endTransmission();
    delay(300);
}
```


5 Integración, pruebas y resultados

En esta sección se detallarán las comprobaciones que se han hecho antes de empezar a medir, descripción del entorno de pruebas y tipo de pruebas que se han realizado, y se mostrarán los resultados que se han obtenido con el potencióstato.

5.1 Comprobaciones previas

Las comprobaciones previas se realizaron con el fin de ver que todos los componentes que forman la placa funcionaban correctamente y en caso contrario poder encontrar posibles fallos.

Antes de empezar a hacer pruebas reales se comprobó que todos los pines de los componentes estaban correctamente soldados a la placa viendo en primer lugar si había conectividad entre las distintas vías y pines de los componentes.

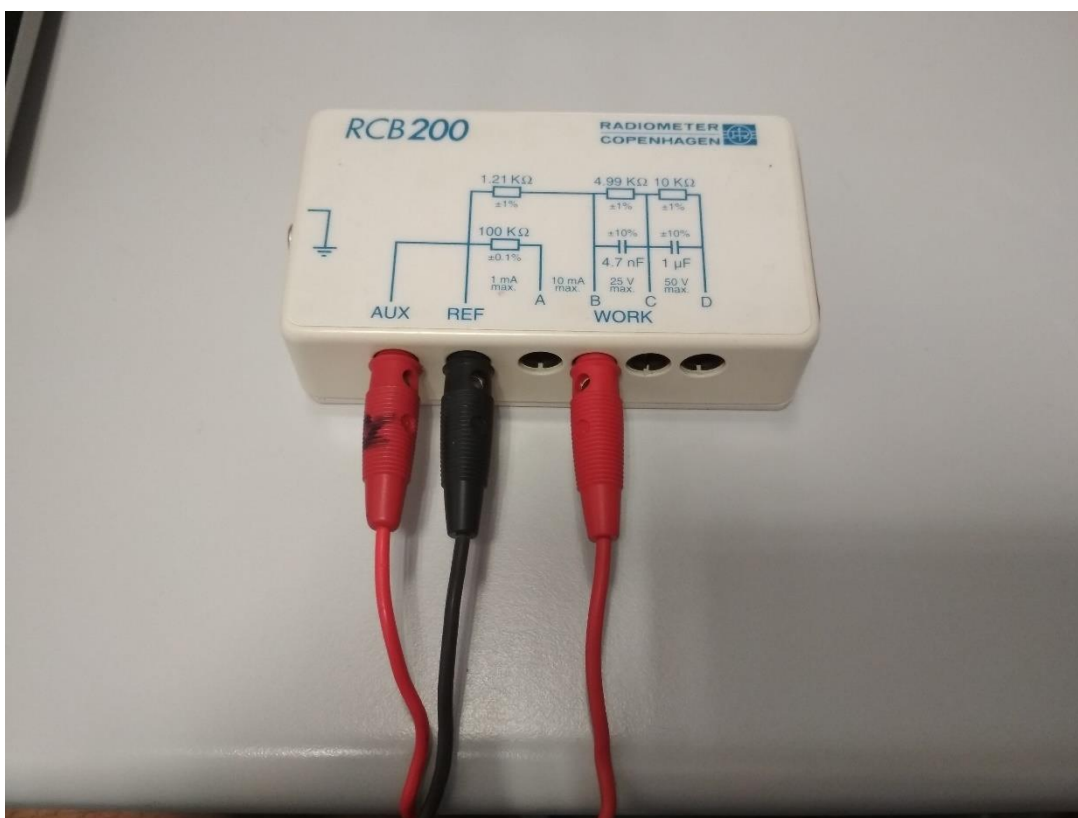


Figura 5-1: Dispositivo simulación electrodos

La función del dispositivo mostrado en la imagen anterior simula la conexión del potencióstato con los tres electrodos de la celda electroquímica. Con esto se pudo ver que a la salida se obtenían valores lógicos de corriente y se veía que esta variaba según en la posición que se conectaba el pin que simulaba el electrodo de trabajo.

Se realizaron las siguientes comprobaciones en los distintos componentes de la placa:

Reguladores de tensión:

Comprobación de que a la salida de cada uno de los reguladores que se han introducido obtienen la tensión deseada.

Antes de realizar estas pruebas se detectó un error en el diseño de la huella del regulador LM7721 [27] para los 5v de alimentación. En el diseño de la huella del componente se asignaron erróneamente el pin GND a Vdd y viceversa, por lo que se tuvo que proceder a intercambiar las conexiones levantando las patas del regulador y conectándolas a la línea correspondiente.

Una vez solucionado esto, estas pruebas han consistido en ver si a la salida se obtienen los 5v, 4v y 2v necesarios para alimentar los distintos componentes del potenciómetro. Utilizando el osciloscopio se ha comprobado que la tensión de salida de cada uno de ellos es correcta y estable, por lo que estas sencillas pruebas fueron satisfactorias.

Conversor ADC

Una vez se configuró correctamente el conversor mediante el bus I2C como se en secciones anteriores, se comenzaron a realizar pruebas de la correcta lectura y conversión de la tensión de entrada del ADC.

Para ello las pruebas que se realizaron fueron comprobar que el valor leído por el conversor y el valor que llegaba a la entrada, medido con el voltímetro, coincidían.

Las primeras pruebas arrojaron resultados nada satisfactorios ya que para un valor de 0.5v a la entrada del conversor se obtenía una tensión negativa en torno a los -2v. La causa de este error era que el conversor puede trabajar en modo diferencial o en modo de conversión única[22] dependiendo de si se utilizan ambas entradas del conversor (AIN0 y AIN1) o solo una (AIN0). Se tuvo que conectar a GND el pin AIN1 para que la conversión fuese correcta. Tras esta corrección se comprobó que el conversor funcionaba bien viendo que los valores a su entrada coincidían con la tensión que había en la vía.

Conversor DAC

Para comprobar que el DAC funciona correctamente bastaba con ver que a la salida se tenía la tensión que se configuraba previamente mediante con el bus I2C, para ello se medía con el voltímetro que en el pin de salida hubiese dicha tensión.

Potenciómetro

Cuando se hubo configurado mediante el bus I2C se levantó uno de los pines del potenciómetro correspondiente a los extremos de la resistencia y mediante el voltímetro se midió el valor de la resistencia que se estaba generando.

En una primera toma de medida se vio que el valor medido no se correspondía con el configurado. Tras leer más detenidamente la hoja de datos [20] del potenciómetro se vio un error en la configuración de pines ya que el pin 5 (/SHDN), que estaba sin conectar a nada, debería ir conectado a Vdd ya que no se usaba.

Una vez que se chequeó que el valor medido era igual al valor programado se determinó el correcto funcionamiento de este componente.

Microcontrolador

Las tres tareas que se llevaron a cabo para probar la correcta integración del microcontrolador en el PCB: conectividad mediante la interfaz ISP, conectividad USB, bus I2C y funcionamiento botones:

- Conectividad con la interfaz ISP (in-system programming): mediante el conector j-tag se vio que se tenían problemas de conectividad en la en el conector. Se detectó que algunos pines de este estaban mal soldados, por lo que una vez se hubo repasado las soldaduras de estas conexiones se vio que esta mala conectividad desapareció.

Para probar que finalmente funcionaba correctamente esta interfaz se cargó mediante ‘Atmel Studio’ un bootloader con el de Arduino Leonardo en el microcontrolador.

- Conectividad vía USB: se comprobó que el microcontrolador era reconocido por el PC al conectarlo con el cable USB y que además lo detectaba como si se tratase de una placa Arduino Leonardo.
- Funcionamiento bus I2C: para comprobar que el bus de comunicaciones I2C se elaboró un sencillo programa para Arduino que fuese capaz de detectar todos los dispositivos que usan este bus y devuelva sus direcciones.

Una vez que se comprobó que las direcciones que se obtenía eran las que se indican en las hojas de datos de los conversores y el potenciómetro se concluyó que el bus I2C funcionaba correctamente.

- Funcionamiento botones configuración: se comprobó que tanto el botón reset, borraba la configuración del microcontrolador, y que el botón boot permitía configurarlo cuando ambos botones se presionaban con la secuencia correspondiente.

Amplificadores operacionales

Para el amplificador que funcionaba como seguidor de tensión, MCP6001 [24], se vio que no estaba funcionando como se esperaba, ya que la tensión a la salida no se correspondía con el valor de la entrada V_+ . El error fue causado por un error en la configuración de los pines en el encapsulado utilizado.

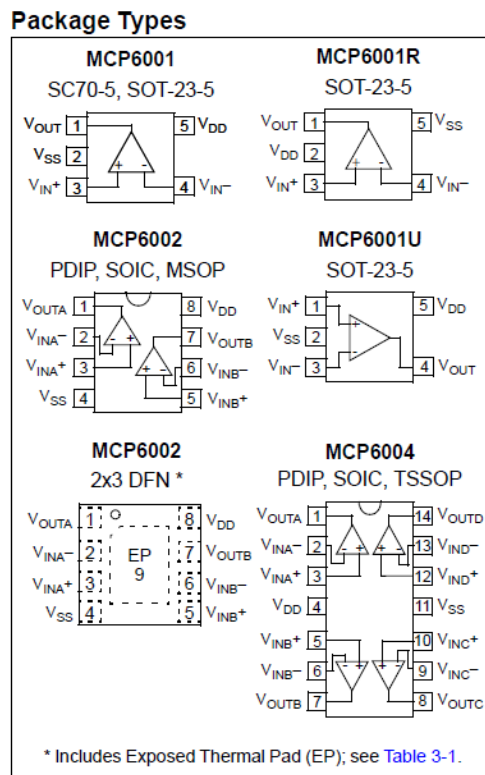


Figura 5-2: Encapsulados AO MCP6001

Como se ve en la imagen anterior existen diversos tipos de encapsulados y cada uno de estos tiene una distribución distinta entre sus pines. En un primer momento se utilizó la correspondiente con el primer encapsulado, MCP6001, aunque el amplificador que se había recibido se correspondía con el MCP6001U, lo que provocaba que ningún pin estuviese correctamente conectado al resto del circuito y su consecuente mal funcionamiento.

Para solucionar esto se tuvieron que cortar algunas líneas y añadir cables auxiliares que ‘parchearan’ el operacional. Una vez hecho esto se comprobó que el seguidor de tensión funcionaba correctamente.

Una vez solucionados todos estos problemas la placa diseñada sería la siguiente:



Figura 5-3: PCB del potenciostato

A esta le corresponden por esquemático el mostrado en el anexo A [A.A] y como esquema de la placa PCB la mostrada en el anexo B [A.B]

5.2 Descripción pruebas realizadas

A continuación, se procederá a explicar el proceso químico que se ha seguido para comprobar el funcionamiento de los potenciostatos.

Preparación de la hidroquinona (HQ) 0.1 M

1. Se disuelven 11 mg de HQ (Eppendorf 1.5 mL) con 1 mL de TF 50 mM pH 6.0.
2. Se agita manualmente la disolución (confirmar que todo el sólido se ha disuelto).
3. Mantener en oscuridad.

Determinación amperométrica

1. Se adicionan 25 mL de TF 50 mM pH 6.0 a la célula de medida, se incluye un imán.
2. Se introducen los 3 electrodos.
3. Se aplica potencial de 0.2 V y se registra la variación de intensidad de corriente
4. Cuando la corriente es estable adicionar 10 - 50 μ L de HQ 0.1 M (variación de corriente positiva).
5. Repetir paso 4 tras estabilizarse la intensidad de corriente.

5.3 Resultados obtenidos

Todas las pruebas se han hecho orientadas a comparar los resultados que arroja un potenciostato comercial, de la empresa Inbea, completamente funcional y que es usado actualmente en el departamento de química de la universidad Complutense de Madrid, y el potenciostato que se ha desarrollado en este trabajo para así, verificar que las medidas que ofrece son correctas.



Figura 5-4: Entorno pruebas potenciostato Inbea

Una vez encendido y conectado los electrodos correspondientes a la celda electroquímica se procedió a usar el SW que permite obtener las gráficas con las medidas. Este se llama Biograph y se encuentra instalado en los PCs del laboratorio. Para usarlo basta con conectar el potenciostato, configurar el potencial que se quiere aplicar a la celda, esto se hace fijando a 0.2v (potencial BIAS) el campo llamado 'Potencial(V)' en la sección 'Canal 1' situado en el panel de la izquierda, después, ya se podrá empezar a capturar. La siguiente imagen muestra la interfaz del programa:

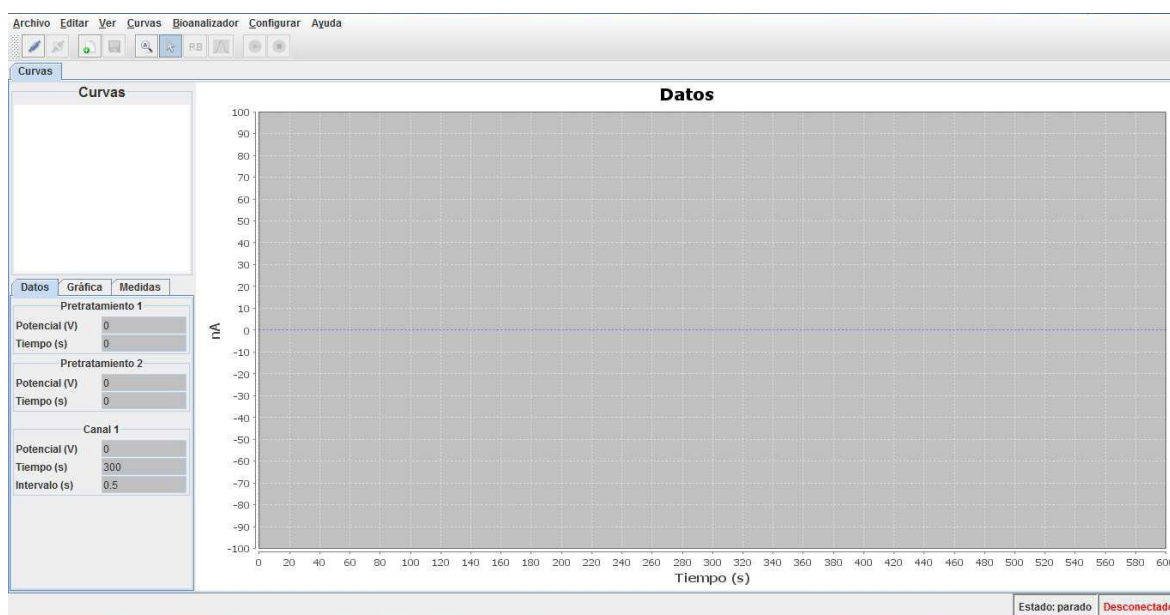


Figura 5-5: Interfaz Biograph

Una vez hecha la captura se procedió a exportar las gráficas en formato CSV para poder compararlos más tarde con los resultados que obtenía del potenciostato de este trabajo. La siguiente imagen muestra los resultados de una medida:



Figura 5-6: Resultados potenciostato Inbea

En la gráfica anterior se ve una primera fase de estabilización de la corriente entre los electrodos y una segunda fase en la que se añadió 25 μL de HQ aproximadamente en la muestra número 125. A partir de ese instante la corriente aumenta 70 nA que indica el nivel de concentración de HQ en la muestra. Con estos resultados se va a comparar la fase de medición para comprobar que bajo las mismas condiciones se ve un escalón similar al de un potenciostato real.

Para probar el potencioestado desarrollado en este trabajo primero se le suministraba 5v usando una fuente de alimentacion, despues se conectaba la placa al PC mediante el puerto USB instalado y se comprobaba que se identifica el microcontrolador como una placa Arduino Leonardo que previamente se habia instalado mediante el conector J-Tag. Una vez establecida la conexión PC-PCB se configuraba los componentes y se conectaban los electrodos a la celda electroquima. En ese momento el ADC ya habra comenzado a capturar valores y se podran componer las graficas.

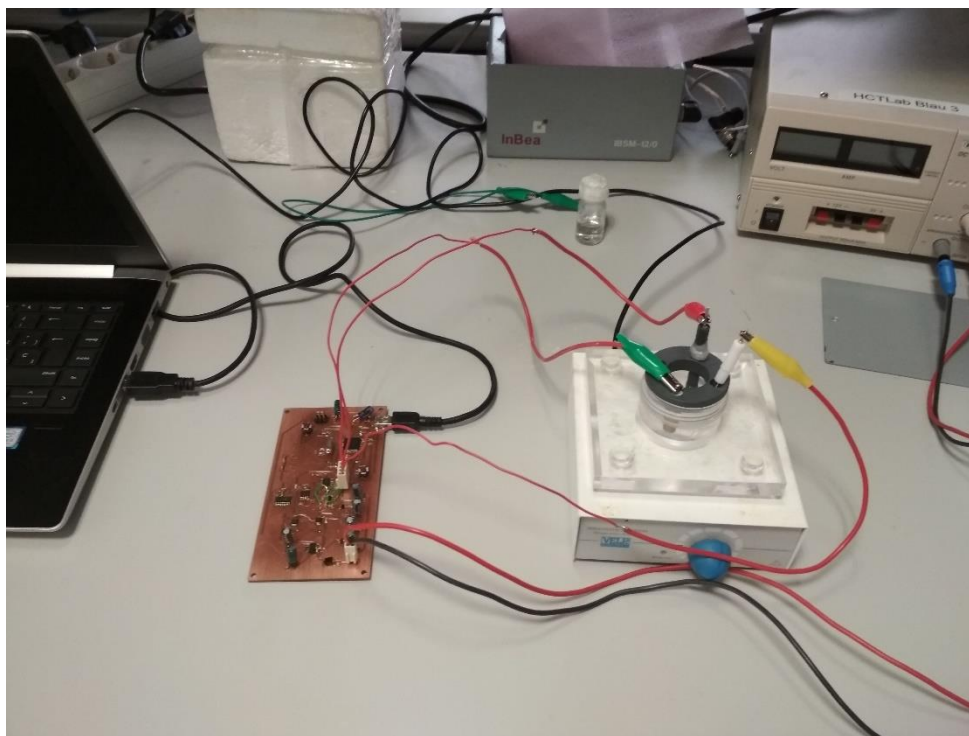


Figura 5-7: Entorno pruebas potencioestado

El resto del proceso del proceso de estabilización de la muestra y adición de la HQ es exactamente igual que en caso anterior. Se espera a que la corriente se estabilice y se añaden los 25 μL . Con esto se compuso el siguiente gráfico con los valores arrojados por el conversor:

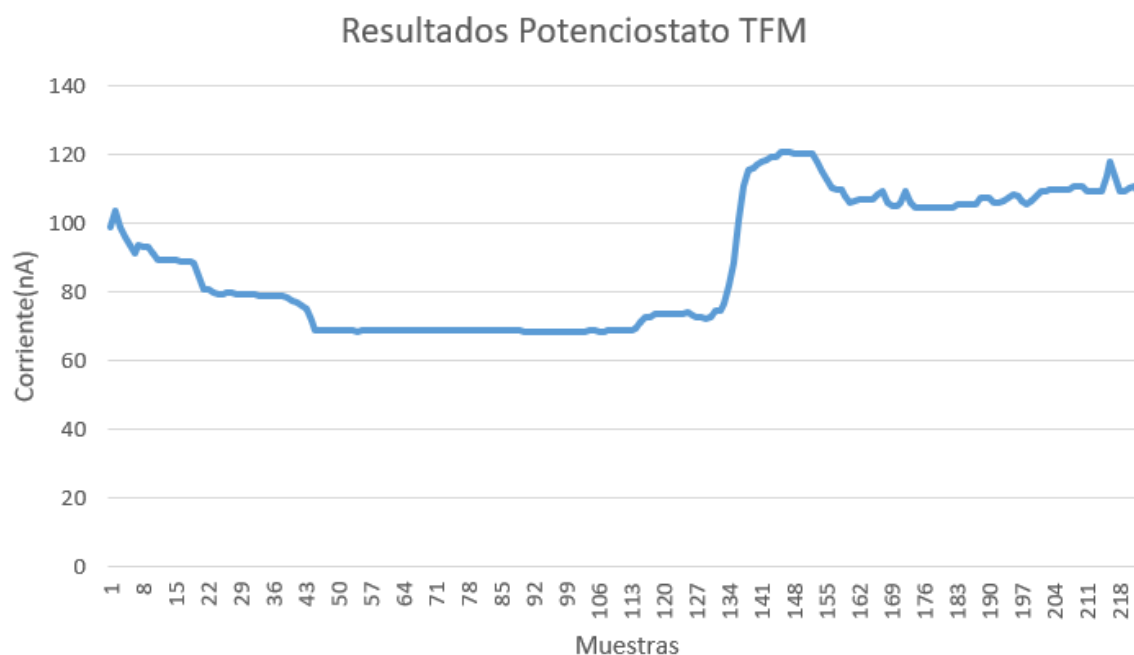


Figura 5-8: Resultados potenciostato TFM

En los resultados se observa que al aplicar el potencial de 0.2v en la celda una primera fase de estabilización de la muestra, una vez se estabilice una corriente constante se procedió a adicionar los 25 μ L de HQ viéndose un rápido aumento de la corriente medida, pasando de los 70nA a un máximo de 120nA, aunque más adelante se observa que esta se estabiliza en torno a las 110nA. Así vemos un escalón de subida de un total de 50nA.

En la siguiente grafica se han superpuesto los resultados obtenidos de ambos potenciostatos en los que se han hecho las pruebas. En ambos casos se han tomado un total de 223 muestras cada medio segundo.

Los 25 μ L de HQ se han intentado agregar en el mismo instante, para el primer caso se ha adicionado en la muestra 125 mientras que en el segundo caso en la muestra 129.

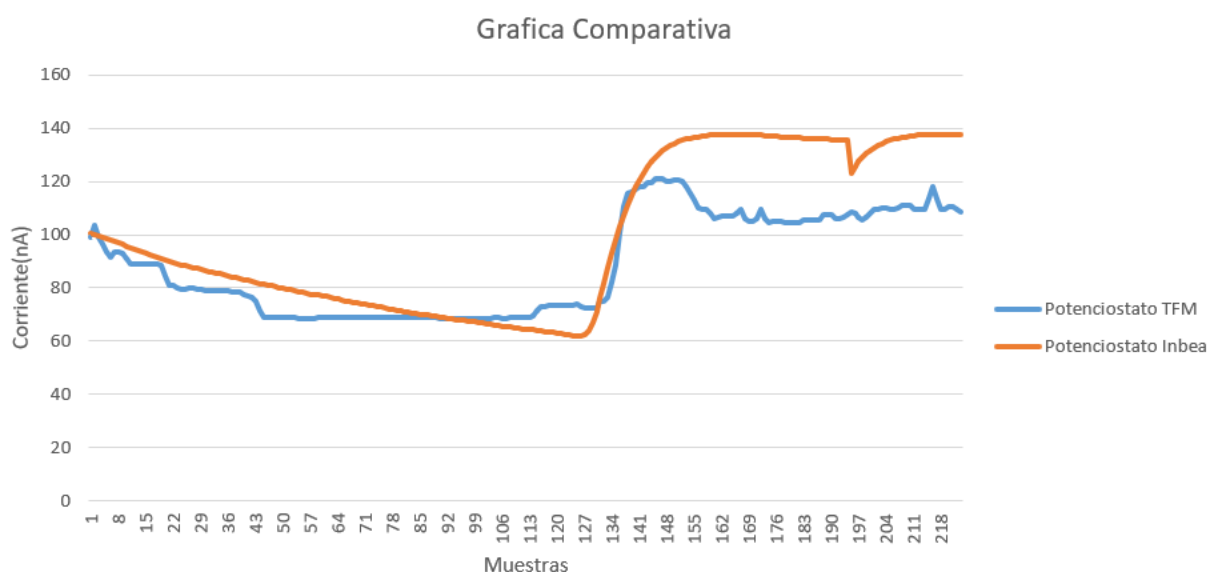


Figura 5-9: Comparativa de resultados

Como se observa en la gráfica se obtienen unos resultados bastantes similares. En ambos se aprecia una primera etapa de estabilización y luego un escalón correspondiente a cuando se ha añadido la HQ. La diferencia de escalones es en torno a los 20nA aunque, como se aprecia en la imagen, el potencióstato de Inbea se mantiene constante en torno a los 140nA mientras que el desarrollado en este trabajo experimenta una breve bajada hasta los 110nA. Esto se ha visto en varias pruebas que se han hecho y se ha concluido que se debe a un desajuste en la calibración ya que como se puede observar no es una diferencia muy grande se ha considerado de dejarlo así debido a que en los valores de la primera fase de estabilización son prácticamente similares, salvo que el proceso de estabilización de este potencióstato ha sido más rápido quizás provocado no ser tan sensible con el otro.

La mayor diferencia se observa en la forma de las curvas que se ha obtenido. En el potencióstato de Inbea se aprecia un mayor tratamiento a nivel SW que la suaviza casi por completo eliminando cualquier rastro de posible ruido. Una buena idea de cara a una posible mejora del diseño del potencióstato desarrollado sería el añadir un mejor tratamiento del ruido a nivel SW tal y como hace el otro. En este trabajo para suavizar la señal, para eliminar tanto diente de sierra, se ha calculado la media de los últimos 10 valores medidos.

6 Conclusiones y trabajo futuro

En esta última sección, se detallarán las conclusiones que se pueden extraer de todo el trabajo desarrollado y además se hará un estudio de posibles mejoras o ampliaciones que se pueden realizar de cara a futuros trabajos.

6.1 Conclusiones

En el actual trabajo, se ha desarrollado el diseño e implementado un potencióstato de tres electrodos para determinar la concentración de sustancias en una muestra.

Para llevar a cabo este trabajo se ha hecho un estudio del actual estado de este tipo de sensores, analizando los distintos diseños y sus principales características. Se analizaron cada una de las partes en las que se puede dividir el potencióstato y se vio como afectaba cada una al conjunto, todo esto para que la elección de componentes fuese lo más sencillas posible y se ajustase a las necesidades de cada una. Cuando la PCB se hubo fabricado y sus componentes fueron soldados se pasó a la configuración vía SW de cada uno de ellos para empezar a hacer mediciones y empezar con el depurado de fallos.

Los resultados obtenidos muestran el buen rendimiento que tiene el sensor en los que, comparando los resultados obtenidos del potencióstato de Inbea y el desarrollado en este trabajo, son bastantes similares. Aunque falta mucho por mejorar en cuanto al tratamiento de ruido encontrado y, más importante aún, realizar una mejor calibración del sistema para conseguir unos resultados más similares viendo la curva de calibración y estabilización al conectarle a la tensión BIAS.

Para finalizar cabe señalar todos los conocimientos que se han ido adquiriendo a lo largo del desarrollo de este trabajo acerca de la fabricación de circuitos impresos y la validación de proyectos de este tipo.

6.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro, todas las mejoras o añadidos pueden ir orientados por un lado a una mayor automatización del potencióstato o por otro lado una mayor especialización en cuanto al tipo de sustancias que va a medir. En este punto se van a sugerir algunas ideas que corresponden con el primer punto de dotar al equipo de una mayor automatización, aparte de una serie de mejoras como trabajo inmediato.

Como se ha podido ver en este tipo de trabajos los componentes que forman el sensor (amplificadores operacionales, microcontroladores, reguladores...) están continuamente evolucionando y mejorando sus características. En definitiva, trabajo inmediato seria la revisión de estos componentes para ir actualizándolos para seguir mejorando la señal de salida o el añadir filtros más complejos para tener una señal más 'limpia'. Además, se podría revisar el diseño de la PCB para una mayor optimización a la hora de colocar las vías y componentes. Además, a la placa fabricada se le detectaron fallos en el diseño y se tuvieron que corregir añadiendo líneas auxiliares o cortando las vías pertinentes, esto es otro punto a favor de revisar el diseño.

Una de las características del potencióstato de Inbea es que poseía dos canales para realizar mediciones. Se podría añadir un segundo canal al realizado en este trabajo para tomar medidas por vías diferentes y ver si ambas coinciden. Esto se podría hacer añadiendo un segundo electrodo de trabajo conectado a su correspondiente conversor I/V y manteniendo igual el resto del circuito.

Otra mejora para realizar es la forma de alimentar la placa, en este diseño como se ha descrito la manera es directamente a una fuente de alimentación mediante unos cables de tipo

‘banana’, si bien no siempre se dispone este tipo de conexión, habría que modificar la manera de alimentar la placa para que esta sea a través del conector USB o modificarlo para conectarlo a una toma de corriente común.

Se ha enseñado que, a la hora de la toma de medidas, además del potenciómetro se necesitaría por un lado, la celda electroquímica a la que van los tres electrodos y un agitador magnético que va a mezclar las disoluciones. Pues bien, se podría realizar como trabajo futuro una integración de todos estos componentes en uno único que mediante una interfaz se puedan configurar todos los componentes (tensión BIAS, valor potenciómetro...) y exportar al PC los resultados que obtiene.

Referencias

- [1] Steven M. Martin, Fadi H. Gebara, Timothy D. Strong, Richard B. Brown, "A Fully Differential Potentiostat", IEEE Sensors Journal, Vol.9, N° 2, Febrero 2009.
- [2] Eduardo Torres Ramirez, Alia Méndez Albores, "Biosensores enzimáticos", Universidad Nacional Autónoma de México.
- [3] Tito Arévalo-Ramirez, Claudia Castillo Torres, Andrés Cela Rosero, "Low cost Potentiostat: Criteria and considerations for its design and construction", Departamento de Automatización y Control Industrial, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador.
- [4] Douglas A. Skoog, F. James Holler, Timothy A. Nieman, "Principios de análisis instrumental", Mc Graw Hill, 5ta. Ed., 2000.
- [5] Marco Vergani, Giorgio Ferrari (sup), "Electronic Instrumentation for Electrochemical Cell Monitoring in Lab-on-Chip Devices", Politecnico di Milano, 2012.
- [6] Luis Ortiz Fuentes, "Desarrollo de un potencióstato para la adquisición y tratamiento de la señal de biosensores enzimáticos", Universidad Autónoma de Madrid, 2013.
- [7] Sergio Díaz Bartolomesanz, "Desarrollo de un sistema de medida de parámetros químicos basado en un sistema empotrado", Universidad Autónoma de Madrid, 2015
- [8] M. A. Carvajal, J. Ballesta-Claver, D.P. Morales, A. J. Palma, M. C. Valencia-Mirón, L.F. Capitán-Vallvey, "Portable reconfigurable instrument for analytical determinations using disposable electrochemiluminescent screen-printed electrodes", Sensors and Actuators B: Chemical, 2012
- [9] Jhon C. Filder, William R. Penrose, James P. Bobis, "A potentiostat based on a voltage-controlled current source for use with amperometric gas sensors", Northern Illinois University.
- [10] Xi Tan, Sizheng Chen, Zhibin Xiao, Feng Chen, Junyu Wang, "A Low Power potentiostat for Implantable Glucose Sensor Tag", Fudan University, 2012.
- [11] Mohammad M. Ahmadi and Graham A. Jullien, "A very Low Power CMOS Potentiostat for Bioimplantable Applications", University of Calgary.
- [12] L. Busoni, M. Carla, L. Lanzi, "A comparison between potentiostatic circuits with grounded work or auxiliary electrode", University of Florence, Istituto Nazionale per la Fisica della Materia, Review of Scientific Instruments, Vol 73, N° 4, April 2002.
- [13] Juan Luis Calabozo Sánchez, "Realización de un Potenciostato", Universidad Rovira, 2004.

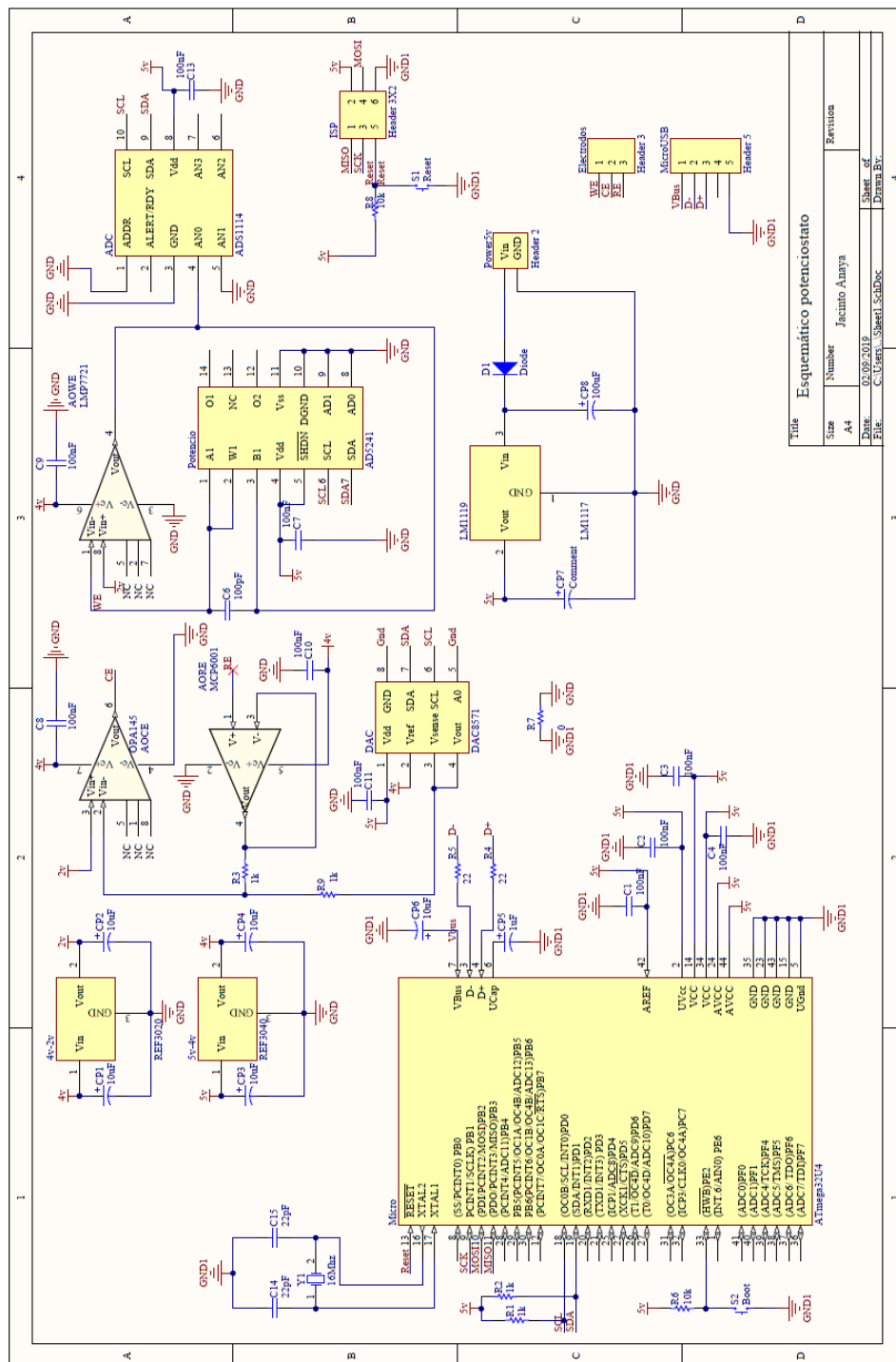
- [14] Maria Isabel Pividori, “Química Bionalítica”, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 2008
- [15] Antonio Martínez-Olmos, Julio Ballesta-Claver, Alberto J. Palma, Maria del Carmen Valencia-Mirón, Luis Fermin Capitán-Vallvey, “A Portable Luminometer with a Disposable Electrochemiluminescent Biosensor for Lactate Determination”, ISSN 1424-8220, 2009.
- [16] Arthur T. Bradley, Jennine Fowler, Brian Yavoich, Stephen Jennings, “Reducing Printed Circuit Board Emissions with Low-Noise Design Practices”, NASA Langley Research Center, Hampton, EEUU.
- [17] “Basic overview of the working principles of a potentiostat/galvanostat – Electrochemical cell setup”, Autolab Application Note.
- [18] “PCB Design Guideline For Reduced EMI”, Texas Instruments, SZZA009, Nov 1999
- [19] Raymond Chang, Williams College, “Química”, Mc Graw Hill, 7ta. Ed., 2002.
- [20] Datasheet potenciómetro AD5241, Analog Devices, Hoja de datos:
https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5241_5242.pdf
- [21] Datasheet conversor digital-analógico DAC8572, Texas Instruments, Hoja de datos:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8571.pdf>
- [22] Datasheet conversor analógico-digital ADS1114, Texas Instruments, Hoja de datos:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1114.pdf>
- [23] Datasheet amplificador operacional OPA145, Texas Instruments, Hoja de datos:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa145.pdf>
- [24] Datasheet amplificador operacional MCP6001, Microchip Techno., Hoja de datos:
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21733j.pdf>
- [25] Datasheet microcontrolador ATmega32u4, Microchip Techno., Hoja de datos:
http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4_datasheet.pdf
- [26] Datasheet amplificador operacional LMP7721, Texas Instruments, Hoja de datos:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp7721.pdf>
- [27] Datasheet regulador de tensión LM1117, Texas Instruments, Hoja de datos:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf>

Gosario

WE	Electrodo de trabajo
RE	Electrodo de referencia
CE	Electrodo auxiliar
AO	Amplificador operacional
ADC	Conversor analógico-digital
DAC	Conversor digital-analógico
HW	Hardware
SW	Software
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
USB	Universal Serial Bus
PCB	Printed Circuit Board

Anexos

A Esquemático Potenciostato



B Esquemático PCB

